

César Duarte Freitas Gonçalves

**Gestão da Manutenção de um Sistema de Cozedura  
na Indústria Cimenteira**

**Lisboa**

**2005**

**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial**

Título da Dissertação:  
**Gestão da Manutenção de um Sistema de Cozedura na Indústria  
Cimenteira**

Por:  
César Duarte Freitas Gonçalves

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa para a obtenção de grau de Mestre em  
Engenharia Industrial

Orientador:  
Professor Doutor José António Mendonça Dias

**Lisboa**  
**2005**

---

Aos meus pais

---

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a todos quantos, de uma forma ou de outra, contribuíram para a execução deste trabalho e me apoiaram nesta jornada. E sendo difícil mencionar a todos, apelo para que de modo algum se sintam esquecidos, aqueles que não constarem nestas páginas.

Os meus agradecimentos sinceros ao Professor José António Mendonça Dias, pela sua orientação científica, pela compreensão demonstrada, pela disponibilidade e esforço desenvolvido que em muito contribuíram para a minha formação e concretização deste trabalho.

Os meus agradecimentos dirigem-se também à Universidade Nova de Lisboa pelo apoio institucional dado ao presente trabalho de investigação.

Ao Centro de Produção de Loulé da Cimpor, Indústria de Cimentos, S.A., designadamente, ao Eng. Carlos Melo, Director do Serviço de Conservação; ao Eng. João Capela, Director do Serviço de Fabricação e Embalagem; ao Eng. Dias Ferreira, Adjunto do Director do Serviço de Conservação; ao Eng. António Oliveira, Técnico do Serviço de Conservação; ao Sr. Armando Pires, Preparador/Visitador; ao Sr. Sérgio Sousa, Técnico Superior de Higiene e Segurança, manifesto especiais agradecimentos pela partilha de informação, pela disponibilidade, pelo espírito de equipa e colaboração técnica que demonstraram, pois esse apoio foi imprescindível para a execução deste trabalho.

Agradeço ao Eng. Bayan Ferreira, na actual Direcção do Centro de Produção de Loulé, pelos meios proporcionados e queria igualmente agradecer a atenção e simpatia com que me receberam todos os colaboradores.

Não posso deixar de atribuir, um especial agradecimento ao Eng. Luís Fernandes, anterior Director do Centro de Produção de Loulé, pelo interesse e intenção manifestada no apoio à realização do presente trabalho.

---

À Susana Palma, pelo estímulo, pela pertinência das suas sugestões e opiniões, que pacientemente colaborou nos arranjos do texto.

Aos meus amigos sem excepção, embora queira agradecer em particular ao Paulo Diogo, à Alexandra Maral, à Vanda Rosa, à Rita Chaves, ao Jorge Pereira, à Filipa Queirós, à Fernanda Pereira, ao Alexandre Palma, à Ana Valente, à Elsa Sousa, ao Silvino Calado, ao Carlos Malarranha e à Ana Rute, pelo estímulo da amizade, pelo incentivo e confiança que me demonstraram em todos os momentos.

Reservo ainda uma palavra de reconhecimento aos meus colegas, docentes e funcionários, do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, pela compreensão e apoio que sempre prestaram.

Para terminar, um grande agradecimento aos meus pais e restantes familiares por toda a compreensão e apoio incondicional, que permitiram a realização deste trabalho, pois sobretudo souberam ultrapassar alguns contratempos.

---

## Sumário

Este trabalho insere-se no âmbito da Gestão da Manutenção tendo como base o estudo de um sistema de cozedura numa indústria cimenteira. O sector do cimento revela ter um forte impacto na economia portuguesa e o nível empresarial anuncia preocupações na equiparação dos sistemas produtivos com as suas congéneres internacionais.

No contexto da Manutenção Industrial torna-se necessária a modelação do comportamento operacional dos equipamentos e a implementação de metodologias que contribuam para uma sustentação eficaz das acções de manutenção.

O estudo apresentado incide num problema de perdas de produção significativas devido à baixa Fiabilidade do sistema de cozedura de uma fábrica. O referido sistema apresenta um elevado número de observações de falha e consequentes perdas de produção. O problema atinge também uma dimensão elevada no que respeita aos tempos de reparação e reposição do processo produtivo.

A metodologia aplicada baseou-se nos Processos Estocásticos Pontuais, vulgarmente conhecidos por Processos de Poisson e identificou a tendência da taxa de falhas para diferentes períodos de funcionamento. Apesar desta metodologia ser tipicamente utilizada em sistemas reparáveis tradicionais, desconhece-se anteriores aplicações a este tipo de sistema.

Os dados recolhidos permitiram também identificar os equipamentos com maior risco de falha e as causas de falha que mais influenciaram o comportamento global do sistema. O estudo contemplou ainda uma análise da Fiabilidade com o cálculo dos convencionais MTBF e MTTR.

Foram encontradas soluções de melhoria baseadas em critérios de Engenharia Mecânica, as quais deram origem a acções de manutenção correctiva.

---

## Summary

This work presents the study of a kiln system in a cement industry in the field of Maintenance Management. The cement sector has a crucial impact in the Portuguese economy, and this sector is starting an effort to keep the pace with its international congenerous.

In the context of the Industrial Maintenance, modelling the operational equipment behaviour becomes essential, as well as the implementation of methodologies that contribute for efficient support of the maintenance actions.

This study focus a problem of significant output losses due to the decrease of the Reliability of kiln cement system in a factory. The referred system presents a high level of productive failures, and its consequent losses of output. The problem reaches also a high dimension in respect to the time of repair and replacement of the productive process.

The applied methodology based on the Stochastic Point Process, commonly known by Poisson Process, and identifies the trend of the failures rate for different operating periods. Although this methodology has been typically used in the traditional repairable system, no previous application on this kind of system has been identified.

The collected data also enables to identify the equipment with higher risk of failure and the causes of failure that more influenced the global system behaviour in a higher degree. The study also includes an analysis of the Reliability with calculation of the conventional MTBF and MTTR indices.

Remarkable improvement solutions were found based in Mechanical Engineering criteria, which gave origin to corrective maintenance actions.

---

## Simbologia e Notações

A	Disponibilidade ( <i>Availability</i> )
AFNOR	Associação Francesa de Normalização
CMMS	Sistema de Gestão da Manutenção por Computador ( <i>Computerized Maintenance Management System</i> )
CMTBF	Tempo cumulativo médio entre falha ( <i>Cumulative Mean Time Between Failures</i> )
CIMPOR	Empresa “Cimpor, Industria de Cimentos, S.A.”
CPL	Centro de Produção de Loulé da “Cimpor, Industria de Cimentos, S.A.”
DA	Data de Arranque do forno
DP	Data de Paragem do forno
EDP	Empresa “EDP, Distribuição-Energia, S.A.”
F	Causa de falha
GR	Grande Reparação
HA	Hora de Arranque do forno
HM	Horas de Marcha do forno
HP	Hora de Paragem do forno
HPI	Horas de Paragens Imprevistas do forno
I	Indisponibilidade
IID	Condição de Independente e Identicamente Distribuído
MTBF	Tempo Médio Entre Falhas ( <i>Mean Time Between Failures</i> )
MTTF	Tempo Médio Até à Falha ( <i>Mean Time To Fail</i> )
MTTR	Tempo Médio Para Reparar ( <i>Mean Time to Repair</i> )
N	Número de ocorrências da amostra, número de falhas
N(T)	Função acumulada do número de falhas
PPH	Processo de Poisson Homogéneo
PPNH	Processo de Poisson não Homogéneo
PPR	Processo de Poisson Homogéneo Ramificado
R	Fiabilidade ( <i>Reliability</i> )
RCM	Manutenção centrada na fiabilidade ( <i>Reliability Centred Maintenance</i> )
ROCOF	Taxa de Ocorrência de Falhas ( <i>Rate of Occurrence of Failures</i> )



---

SR	Sistemas Reparáveis
TBF	Tempo de Bom Funcionamento entre falhas
TPM	Manutenção Produtiva Total ( <i>Total Productive Maintenance</i> )
TR	Tempo de Reparação da falha
TT	Tempo Total de estudo
$\hat{\lambda}$	Coeficiente do modelo de Crow
$\beta$	Coeficiente do modelo de Crow
$\pi_1$	Coeficiente para calcular $\theta_i$ , modelo de Crow
$\pi_2$	Coeficiente para calcular $\theta_s$ , modelo de Crow
$H_0$	Hipótese nula, teste de Laplace
$H_1$	Hipótese alternativa, teste de Laplace
$\theta_i$	Limite inferior do intervalo de confiança para o MTBF, modelo de Crow
$\theta_s$	Limite superior do intervalo de confiança para o MTBF, modelo de Crow
$\alpha$	Nível de significância do teste estatístico
$n_f$	Número total de falhas para um determinado período
$\lambda$	Taxa de falhas
$\rho$	Taxa de falhas, modelo de Crow
$Z_0$	Teste de Laplace
$\mu$	Taxa de reparação ou taxa de manutibilidade
$\tau_i$	Tempo de vida no momento da falha
$T$	Tempo de duração do teste, modelo de Crow
$T_0$	Tempo de duração do teste, teste de Laplace
$\theta$	Tempo médio de bom funcionamento (MTBF), modelo de Crow
$Z_\alpha$	Valor da normal padronizada para o nível de significância $\alpha$ , teste de Laplace

---

## Índice de Matérias

### CAPÍTULO 1

#### INTRODUÇÃO

1.1. Âmbito da Dissertação .....	1
1.2. Objectivos da Dissertação .....	3
1.3. Estrutura da Dissertação .....	4

### CAPÍTULO 2

#### INDÚSTRIA CIMENTEIRA: EXPLORAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO

2.1. Introdução .....	7
2.2. Indústria Cimenteira .....	8
2.2.1. História da Indústria Cimenteira .....	8
2.2.2. CIMPOR .....	10
2.2.3. Centro de Produção de Loulé da CIMPOR .....	11
2.2.4. Produção e Consumo .....	12
2.2.5. Fabrico do Cimento .....	13
2.2.5.1. Processos de Fabricação: Via Húmida e Via Seca .....	13
2.2.5.2. Extracção da Matéria-Prima .....	14
2.2.5.3. Preparação, Transporte e Armazenagem .....	15
2.2.5.4. Obtenção do Cru .....	15
2.2.5.5. Forno e Cozedura .....	15
2.2.5.6. Transformações do Cru até à Formação do Clinquer .....	17
2.2.5.7. Reacções Químicas Durante a Cozedura .....	17
2.2.5.8. Moagem .....	17
2.2.5.9. Controlo do Processo de Qualidade .....	19
2.2.5.10. Tipos e Classes de Cimento .....	20
2.3. Manutenção na Cimpor .....	20
2.3.1. Planeamento da Manutenção e Preparação no CPL .....	21
2.4. A Fiabilidade no Sistema de Cozedura .....	24
2.4.1. Sistemas e Equipamentos em Estudo .....	28

### CAPÍTULO 3

#### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução .....	31
3.2. Manutenção no Contexto Actual .....	32
3.3. Definição dos Principais Conceitos .....	34
3.3.1. Manutenção .....	34
3.3.1.1. Função da Manutenção .....	35
3.3.1.2. Classificação da Manutenção .....	37
3.3.2. Plano de Manutenção ou Programa de Manutenção .....	40
3.3.3. Manutibilidade .....	41

---

3.3.4. MTBF e MTTR .....	41
3.3.5. Disponibilidade .....	43
3.3.6. Fiabilidade .....	44
3.3.7. Equipamento Redundante .....	45
3.4. Sistemas Reparáveis/Não Reparáveis .....	45
3.5. Análise Estatística das Falhas .....	46
3.6. Taxa de Falhas .....	48
3.7. Teste de Laplace .....	51
3.8. Processos de Poisson .....	52
3.8.1. Processos de Poisson não Homogéneos (PPNH) .....	55
3.8.1.1. Sistemas com Taxa de Falhas Decrescente .....	55
3.8.1.2. Sistemas com Taxa de Falhas Crescente .....	57
3.8.2. Processos de Poisson Ramificados (PPR) .....	59
3.8.3. Processos de Poisson Homogéneos (PPH) .....	59
3.8.3.1. Sistemas com Taxa de Falhas Constante .....	60

## **CAPÍTULO 4**

### **RECOLHA E DIAGNÓSTICO DAS FALHAS DO SISTEMA PRODUTIVO**

4.1. Introdução .....	62
4.2. Recolha de Dados .....	63
4.3. Diagnóstico das Causas de Paragem do Forno .....	70
4.3.1. Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica (F01) .....	70
4.3.2. Falta de Água (F02) .....	71
4.3.3. Falta de Ar Comprimido (F03) .....	72
4.3.4. Subestação / Sala Eléctrica (F04) .....	73
4.3.5. Tensão de Comando e Instrumentação (F05) .....	73
4.3.6. Circuito de <i>Fuel-oil</i> (F06) .....	74
4.3.7. Moagem de Combustível Sólido (F07) .....	75
4.3.8. Filtro de Mangas do Processo de Despoeiramento (F08) .....	76
4.3.9. Electrofiltro, Despoeiramento (F09) .....	76
4.3.10. Torre de Condicionamento, Despoeiramento (F10) .....	77
4.3.11. Transportador Metálico (F11) .....	77
4.3.12. Transportador de Correias (F12) .....	78
4.3.13. Elevadores (F13) .....	78
4.3.14. Caleira Porosa (F14) .....	79
4.3.15. Doseadores e Pesadores (F15) .....	79
4.3.16. Analisador de Gases “ <i>on-line</i> ” (F16) .....	79
4.3.17. Britador de Clinquer (F17) .....	80
4.3.18. Moinho/Separador (F18) .....	80
4.3.19. Forno (F19) .....	81
4.3.20. Arrefecedor (F20) .....	82
4.3.21. Ventilador de Tiragem do Processo (F21) .....	84
4.3.22. Lubrificação (F22) .....	84
4.3.23. Sistema de Transmissão (F23) .....	85
4.3.24. Disparo do Motor Principal (F24) .....	85
4.3.25. Encravamento/Limpeza/Inspeção da instalação (F25) .....	86

4.3.26. Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos (F26) .....	87
4.3.27. Refractário (F27) .....	89

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISE E MODELAÇÃO DAS FALHAS DO SISTEMA DE COZEDURA**

5.1. Introdução .....	90
5.2. Modelação da Taxa de Falhas do Sistema .....	91
5.2.1. Período desde o início do estudo até à primeira Grande Reparação (Início até GR1) .....	92
5.2.2. Período desde a primeira à segunda Grande Reparação (GR1 até GR2) .....	96
5.2.3. Período desde a segunda à terceira Grande Reparação (GR2 até GR3) ...	104
5.2.4. Período desde a terceira Grande Reparação até ao fim do estudo (GR3 até Fim) .....	108
5.2.5. Comparação dos resultados obtidos no estudo da tendência da taxa de falhas do sistema .....	113
5.3. Tempo Médio Entre Falhas e Tempo Médio de Reparação.....	114
5.3.1. Períodos com taxa de falhas constante: Início até GR2 .....	115
5.3.2. Período com taxa de falhas decrescente: GR2 até GR3 .....	117
5.3.3. Período com taxa de falhas crescente: GR3 até Fim .....	121
5.3.4. Comparação dos resultados obtidos no estudo do tempo médio entre falhas e tempo médio de reparação do sistema .....	125
5.4. Fiabilidade do Sistema de Cozedura de Cimento .....	128
5.5. Discussão dos Resultados e Propostas de Melhoria .....	130
5.5.1. Causa de falha F26, Encravamento de Ciclones .....	130
5.5.2. Causa de falha F23, Sistemas de Transmissão e causa de falha F22, Lubrificação .....	138
5.5.3. Causa de falha F19, Forno e causa de falha F27, Refractário .....	140
5.5.4. Causa de falha F20, Arrefecedor .....	143
5.5.5. Causa de falha F21, Ventilador de Tiragem do Processo .....	144
5.5.6. Outras causas de falhas .....	146

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

6.1. Conclusões .....	148
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	158

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	161
---	-----

<b>ANEXO I - Sistema de Cozedura de Cimento</b> .....	165
---	-----

I.1. Introdução .....	165
I.2. Esquema do Sistema de Cozedura de Cimento .....	165
I.3. Fotografias do Sistema de Cozedura .....	167

---

<b>ANEXO II - Dados Recolhidos .....</b>	<b>171</b>
II.1. Introdução .....	171
II.2. Apresentação dos Dados .....	171
 <b>ANEXO III - Dados Seleccionados .....</b>	 <b>177</b>
III.1. Introdução .....	177
III.2. Apresentação dos Dados .....	177
III.3. Dados Seleccionados .....	179
 <b>ANEXO IV - Tabelas Estatísticas .....</b>	 <b>189</b>
 <b>ANEXO V - Canhões de Ar Comprimido .....</b>	 <b>194</b>
V.1. Introdução .....	194
V.2. Canhões de Ar .....	194
V.3. Disposição dos Canhões de Ar nos Ciclones .....	197
V.4. Fotografias de Equipamentos com Canhões de Ar Instalados .....	198

---

## Índice de Figuras

2.1 – Esquema do Centro de Produção de Loulé da Cimpor .....	12
2.2 – Diagrama do fabrico do cimento .....	19
2.3 – Diagrama de fluxo do fabrico de cimento no CPL, ano de 2003 .....	27
2.4 – Esquema simplificado do sistema de cozedura do CPL .....	29
3.1 – Classificação dos tipos de Manutenção .....	37
3.2 – Exemplo de um Processo Estocástico Pontual .....	49
3.3 – Análise estatística da ordem cronológica das falhas .....	54
4.1 – Sala de comando do Centro de Produção de Loulé da Cimpor .....	64
5.1 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (Início até GR1) .....	93
5.2 – Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (Início até GR1) .....	95
5.3 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (GR1 até GR2) .....	97
5.4 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (1º período de GR1/GR2) .....	98
5.5 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (2º período de GR1/GR2) .....	99
5.6 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (3º período de GR1/GR2) .....	100
5.7 – Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (GR1 até GR2) .....	103
5.8 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (GR2 até GR3) .....	105
5.9 – Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (GR2 até GR3) .....	107
5.10 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (GR3 até Fim) .....	110
5.11 – Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (GR3 até Fim) .....	112
5.12 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema e respectivo valor esperado ajustado pelo modelo de Crow (GR2 até GR3) .....	119
5.13 – Evolução do MTBF estimado para um período de vida do sistema .....	120
5.14 – Evolução do CMTBF ao longo do período (GR3 até Fim) .....	122
5.15 – Aplicação de canhões de ar comprimido em ciclones .....	135
5.16 – Disposição dos canhões de ar instalados no ciclone 4 da torre de pré-aquecimento .....	136
5.17 – Disposição dos canhões de ar instalados na câmara de fumos junto à entrada para o forno .....	136
5.18 – Rolete de apoio do forno, junto à beija do forno .....	139
5.19 – Trajectória de ar quente e poeiras provenientes do arrefecedor para o interior do forno .....	142
I.1 – Esquema do sistema de cozedura de cimento .....	166

---

I.2 – Torre de pré-aquecimento e início do forno .....	167
I.3 – Torre de pré-aquecimento e forno .....	167
I.4 – Forno, visto do topo da torre de pré-aquecimento .....	168
I.5 – Arrefecedor .....	168
I.6 – Fim do forno e início do arrefecedor .....	169
I.7 – Queimador (tubeira), fim do forno .....	169
I.8 – Pré-calcinador na torre de pré-aquecimento .....	170
V.1 – Funcionamento do canhão de ar comprimido .....	195
V.2 – Possível disposição de canhões de ar comprimido num sistema de pré-aquecimento .....	195
V.3 – Canhão de ar comprimido montado no exterior de um ciclone .....	196
V.4 – Bocais de canhões de ar comprimido para diferentes localizações .....	196
V.5 – Disposição de canhões de ar comprimido num ciclone (Alçado Principal) .....	197
V.6 – Disposição de canhões de ar comprimido num ciclone (Planta) .....	197
V.7 – Canhão de ar instalado no ciclone 2 da torre de pré-aquecimento .....	198
V.8 – Cone do ciclone 2 da torre de pré-aquecimento com canhões de ar instalados .....	198
V.9 – Disposição dos canhões de ar instalados no ciclone 3 da torre de pré-aquecimento .....	199
V.10 – Canhão de ar instalado na saída do ciclone 4 da torre de pré-aquecimento .....	199
V.11 – União das tubagens dos ciclones 3 e 4 com a câmara de fumos, entrada para o forno, também com canhões de ar instalados .....	200
V.12 – Disposição dos canhões de ar instalados na câmara de fumos, entrada para o forno .....	200

---

## Índice de Quadros

4.1 – Lista codificada das causas de paragem do equipamento (dados recolhidos) .....	66
4.2 – Lista codificada das causas de paragem do forno em estudo .....	67
4.3 – Acrónimos dos quadros de dados em estudo .....	69
5.1 – Horas acumuladas por falha ocorrida (Início até GR1) .....	92
5.2 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (Início até GR1) .....	94
5.3 – Tempo de reparação por tipo de causa (Início até GR1) .....	95
5.4 – Horas acumuladas por falha ocorrida (GR1 até GR2) .....	96
5.5 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (GR1 até GR2) .....	102
5.6 – Tempo de reparação por tipo de causa (GR1 até GR2) .....	104
5.7 – Horas acumuladas por falha ocorrida (GR2 até GR3) .....	105
5.8 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (GR2 até GR3) .....	107
5.9 – Tempo de reparação por tipo de causa (GR2 até GR3) .....	108
5.10 – Horas acumuladas por falha ocorrida (GR3 até Fim) .....	109
5.11 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (GR3 até Fim).....	111
5.12 – Tempo de reparação por tipo de Causa (GR3 até Fim) .....	112
5.13 – Variação da taxa de falhas nos vários períodos.....	113
5.14 – MTBF e outros indicadores (Início até GR2) .....	117
5.15 – MTBF e outros indicadores (GR2 até GR3) .....	121
5.16 – MTBF e outros indicadores (GR2 até Fim) .....	125
5.17 – Variação do MTBF e outros índices nos vários períodos.....	125
II.1 – Acrónimos dos quadros de dados em estudo.....	171
II.2 – Listagem da recolha de dados .....	172
III.1 – Lista codificada das causas de paragem do forno em estudo .....	178
III.2 – Acrónimos dos quadros de dados em estudo .....	178
III.3 – Dados desde o início do estudo até à primeira Grande Reparação (Início até GR1) .....	180
III.4 – Dados desde a primeira Grande Reparação à segunda Grande Reparação (GR1 até GR2) .....	181
III.5 – Dados desde a segunda Grande Reparação à terceira Grande Reparação (GR2 até GR3) .....	184
III.6 – Dados desde a terceira Grande Reparação ao fim do estudo (GR3 até Fim) .....	187



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Âmbito da Dissertação

Para muitas organizações é importante responder à pressão competitiva global, procurando aumentar as suas produtividades, maximizando a eficácia total do equipamento e assegurando um programa de manutenção eficaz e eficiente (Cholasuke et al., 2004). O conceito de Manutenção tem evoluído e continua a evoluir no tempo e, conseqüentemente, dentro de cada organização.

Um nível aceitável do desempenho da indústria é simplesmente inatingível sem uma sustentação eficaz da Gestão da Manutenção (Cholasuke et al., 2004). Cada vez mais o engenheiro é chamado a lidar com a variabilidade e incerteza, pois todas as grandezas e propriedades com que trabalha apresentam na prática um certo grau de variabilidade. A Fiabilidade é um aspecto da incerteza da engenharia.

A Manutenção assume um papel determinante visto ser essencial para garantir a disponibilidade e a Fiabilidade dos equipamentos utilizados nos processos produtivos, influenciando de forma significativa o nível de qualidade dos bens produzidos e os custos de produção.

A previsão de falhas nos sistemas é hoje o ponto de partida para a eficácia na actuação das equipas de manutenção, e é um factor chave para uma correcta organização da produção. Uma manutenção planeada, que actua no momento exacto, maximizando os meios de produção, é por excelência o modelo ideal para a minimização dos custos de manutenção inerentes. Por um lado, maximizando a

utilização dos equipamentos, por outro, minimizando os custos causados por paragens imprevistas ou mesmo por intervenções e substituições desnecessárias.

É fundamental que se equacionem modelos de estudo de falhas que contribuam para a melhoria na análise e previsão das condições de trabalho dos equipamentos, com o objectivo de reduzir as paragens não planeadas e garantir a segurança das pessoas e dos bens, assim como a qualidade requerida do produto.

Os modelos de Fiabilidade são ferramentas de que a manutenção dispõe, cuja aplicação, em qualquer unidade produtiva, permitirá com elevada exactidão determinar o que deve ser feito, e planear a melhor actuação nas missões das equipas de manutenção, no sentido de uma melhoria contínua da disponibilidade dos equipamentos pelo menor custo, isto é, estabelecer planos de manutenção proactiva. É fundamental focalizar os eventuais problemas de disponibilidade e conhecer os modos de falha dos sistemas para tomar as medidas correctivas mais convenientes, de modo a aumentar a Fiabilidade e desta forma maximizar a disponibilidade dos mesmos.

No âmbito desta dissertação são utilizados métodos estatísticos para estudar a tendência da taxa de falhas ocorridas nos equipamentos que compõem o sistema de cozedura de uma indústria cimenteira, mais concretamente no Centro de Produção de Loulé (CPL) da “Cimpor, Industria de Cimentos, S.A.”. Para tal foi feita uma recolha de dados referentes à ocorrência de falhas no sistema, permitindo um estudo com fundamento sólido no sentido de serem obtidos resultados que traduzam um correcto cenário da realidade.

Importante, será também conhecer o funcionamento de todo o processo produtivo e funcionalidades dos equipamentos, tal como informação histórica que relate e caracterize a vida útil desses equipamentos. Com o cruzamento de toda a informação recolhida e com os resultados estatísticos alcançados, pretende-se explicar de um modo lógico e científico todo o processo das falhas e desta forma avaliar e ajustar as acções de manutenção correctiva e preventiva a implementar, tendo em vista a minimização dos riscos de falha e consequentes perdas de produção.

No âmbito da Gestão da Manutenção, este estudo pretende também ser uma cooperação na antevisão de cenários de falha. Com o referido estudo pretende-se dar um contributo válido na melhoria das acções correctivas e preventivas da manutenção, de modo a alcançar resultados de disponibilidade superiores aos actuais, e desta feita, chegar a valores tanto ansiados pelo departamento de manutenção da referida instituição.

Por consequência, passa também pelo âmbito desta investigação, dar um contributo na ampliação de conhecimentos e aplicação de modelos, actualmente mais exactos e de maior relevo a todos aqueles que nela estão envolvidos. Pretende-se ainda, apresentar vantagens e conteúdos no campo da manutenção, utilizando ferramentas estatísticas e métodos de trabalho adequados, mais versáteis na gestão das acções a desenvolver, baseada em factores estatisticamente significativos.

## **1.2. Objectivos da Dissertação**

O trabalho que se apresenta insere-se no âmbito da Gestão da Manutenção, tendo como base o estudo de um sistema de cozedura numa indústria cimenteira.

O principal objectivo é dar uma contribuição significativa para uma melhoria da disponibilidade e Fiabilidade dos equipamentos em causa. Para tal, pretende-se avaliar a disponibilidade global do sistema, convergindo para um estudo mais incidente nos subsistemas que se venham a identificar com maior risco de falha.

Com o referido estudo pretende-se avaliar e ajustar as acções de manutenção correctiva e preventiva a implementar, tendo em vista a minimização dos riscos de falha e consequentes perdas de produção. Pretende-se também contribuir com sugestões para a correcção das medidas preventivas, a tomar ao nível da manutenção de equipamentos que se venham a revelar mais críticos.

Pretende-se utilizar um conjunto de metodologias e modelos estatísticos entendidos como os mais adequados aos dados recolhidos das ocorrências de falhas dos sistemas reparáveis a abordar.

A metodologia utilizada consiste num tratamento específico de dados históricos, recolhidos de livros de registo de falhas ocorridas do CPL, que após a sua ordenação cronológica, constitua uma base de dados capaz de aceitar as ferramentas estatísticas que se propõem aplicar.

O objectivo passa por identificar as razões que contribuem para uma determinada tendência da taxa de falhas, bem como determinar as causas que mais influenciam a disponibilidade do sistema, subsistemas e seus componentes nos períodos de estudo considerados.

Avaliar o risco de falha do sistema é fundamental, tal como estimar previsões temporais para a falha e a duração das respectivas reparações, fornecendo as informações necessárias para um correcto plano nas intervenções das equipas de manutenção junto dos sistemas reparáveis. A antevisão de cenários de falha é um contributo importantíssimo na melhoria da manutibilidade dos equipamentos, isto é, é importante saber o que falha, quando falha e também ter um conhecimento prévio de como realizar a reparação. Tudo isto só é possível se planeado antecipadamente.

O objectivo da presente dissertação é o desenvolvimento de modelos apropriados para avaliar a disponibilidade do sistema de cozedura de cimento do CPL, quer para o seu conjunto, quer para os subsistemas que o constituem. O ponto de partida é clarificar devidamente o tipo de problemas a que o sistema está sujeito e as condições de fronteira.

Importante é também conhecer devidamente as limitações do estudo em função da informação disponível. A condução do estudo tem de partir de uma base sólida e orientada para uma saída de resultados conducente a resultados fidedignos.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

No presente capítulo (capítulo 1), pretende-se dar a conhecer o fundamento da investigação e apresentar genericamente o trabalho desenvolvido. São apresentados o âmbito, os objectivos e a própria estrutura da dissertação.

No capítulo 2, pretende-se introduzir o leitor no contexto do estudo em causa. Julgou-se interessante e necessário, apresentar uma breve elucidação ao tema “Indústria Cimenteira”. Assim, é feito um pequeno enquadramento da indústria cimenteira em Portugal e no Mundo, é apresentada a empresa Cimpor, Indústria de Cimentos, S.A., dando especial atenção ao seu Centro de Produção de Loulé (CPL) e explicado de modo sucinto o processo produtivo. É também apresentado um breve resumo às práticas de manutenção desenvolvidas pelos profissionais da manutenção, tal como uma análise ao planeamento e preparação da manutenção no CPL. Ainda neste capítulo é apresentado o problema que despoletou a necessidade desta dissertação e também os sistemas e equipamentos em estudo, que compõem o sistema de cozedura no CPL.

As apresentações feitas no capítulo 2, para além de melhor elucidar sobre o tema da dissertação e a sua aplicabilidade neste tipo de indústria, fundamentam em termos gerais a necessidade de criar condições de melhoria na disponibilidade e Fiabilidade dos equipamentos.

O capítulo 3 é exclusivamente dedicado a uma revisão bibliográfica, procurando referenciar de forma abrangente conteúdos e metodologias necessárias ao desenvolvimento da dissertação. Procurou-se enquadrar a manutenção no contexto actual, definir os principais conceitos e mais pormenorizadamente, apresentar o conjunto das técnicas estatísticas mais utilizadas na análise de falhas e da disponibilidade dos equipamentos. Na sua maioria, os aspectos focados foram utilizados nesta dissertação e houve sempre a preocupação em recorrer a publicações científicas, fontes fidedignas e actuais na recolha de elementos.

No capítulo 4 são descritos os procedimentos ao nível da recolha de dados, pormenorizando os aspectos que se julgaram de interesse para uma boa compreensão de todo o trabalho desenvolvido. Esta foi uma fase do trabalho que implicou um cuidado especial, no sentido de apresentar um cenário correcto da realidade dos sistemas envolvidos, para posteriormente poder chegar a resultados capazes de fazer cumprir os objectivos desta investigação.

A aplicação do tema propriamente dito é descrita e apresentada no capítulo 5, isto é, a aplicação prática na análise e modelação das falhas do sistema de cozedura. Neste capítulo, são analisados os dados recolhidos e aplicadas as ferramentas e metodologias apresentadas no capítulo 3. São avaliadas as causas de falha com maior índice de ocorrência e as causas que provocam maior duração nas interrupções. Podem-se encontrar neste capítulo um conjunto de quadros e figuras, cuja análise evidência o comportamento do sistema. São ainda feitas estimativas, avaliadas as condições de trabalho dos equipamentos e descritas algumas soluções equacionadas pelos técnicos do CPL. Também são propostas algumas soluções no sentido de contribuir para o alcance de melhorias significativas da disponibilidade e Fiabilidade do sistema em estudo.

O capítulo 6 é dedicado à apresentação das conclusões da aplicabilidade dos modelos usados, sugestões e propostas para trabalhos futuros.

Após o capítulo 6, seguem-se as referências bibliográficas, que contemplam as fontes pesquisadas e que serviram de base à fundamentação e desenvolvimento da dissertação.

No final deste trabalho é apresentado um conjunto de 5 anexos, onde se encontram os dados recolhidos referentes às falhas, fotografias, imagens, desenhos e esquemas dos equipamentos estudados. Podem-se encontrar ainda nos anexos, as tabelas estatísticas de onde foram retirados valores para os modelos utilizados.

# CAPÍTULO 2

## INDÚSTRIA CIMENTEIRA: EXPLORAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO

### 2.1. Introdução

Pretende-se neste capítulo fazer um pequeno enquadramento da indústria cimenteira em Portugal e no Mundo de modo a melhor elucidar sobre o tema da dissertação e a sua aplicabilidade neste tipo de indústria.

Serve também, a leitura desta secção para uma melhor familiarização com os equipamentos, processos, metodologias e terminologia utilizados na indústria cimenteira, constituindo uma informação importante para uma melhor compreensão de todo o estudo apresentado.

Ainda neste capítulo é feito um breve resumo às práticas de manutenção desenvolvidas pelos profissionais da manutenção do CPL e apresentado o problema que despoletou a necessidade desta dissertação.

A informação contida e descrita ao longo deste capítulo foi fornecida, na sua maioria, pelo CPL sobre a forma de documentação interna diversa, tais como fichas técnicas, catálogos, manuais, livros técnicos e ainda apontamentos recolhidos em reuniões com funcionários e equipas técnicas do CPL. No entanto, foi também realizada pesquisa bibliográfica para fundamentar determinados aspectos e aprofundar conhecimentos.

## **2.2. Indústria Cimenteira**

A indústria do cimento constitui hoje uma das actividades mais representativas da economia portuguesa.

A produção acompanhou sempre o crescimento do mercado interno e passou a assegurar a auto-suficiência do abastecimento a partir da década de 20. Actualmente, a indústria cimenteira portuguesa parece não temer a comparação com as suas congéneres europeias em termos de “performance”, tecnologia e de eficiência económica. Pode afirmar-se que a indústria cimenteira portuguesa dispõe de todos os requisitos humanos e estruturais para continuar a expandir-se e a competir com sucesso quer no espaço nacional, quer internacionalmente como revelam as iniciativas levadas a cabo nos últimos anos pelas duas empresas produtoras (Gomes, citado em Oliveira, 1999).

### **2.2.1. História da Indústria Cimenteira**

Produzido directamente das matérias-primas que a natureza disponibiliza, o cimento é hoje um dos produtos mais usados pelo homem, no entanto, desconhece-se quando foi descoberto pela primeira vez um material aglomerante, mas poder-se-á imaginar o seu percurso evolutivo.

Coimbra (1999) supõe que a história talvez tenha começado pouco depois da descoberta do fogo. Um homem primitivo acende o lume num lugar rodeado de pedras calcárias e gesso. O calor descarboniza e desidrata uma parte das pedras circundantes, convertendo-as em pó. A queda de uma ligeira chuva molha o pó e os bocados de pedra restantes ficam solidamente unidos originando o primeiro aglomerado.

Ao longo dos tempos, o gesso impuro cozido foi um dos materiais aglomerantes mais utilizados. Coimbra (1999) diz que por investigações arqueológicas, sabe-se que os ligantes utilizados na construção das pirâmides do Egipto eram obtidos por



cozedura imperfeita de gesso impuro contendo calcário a temperaturas da ordem dos 150 °C.

Mais tarde começou-se a utilizar misturas de cal, areia, pedra partida e outros materiais, para a construção de edifícios e de pavimentos, uma vez que a cal só com areia e água era apenas usada para unir estruturas de pedra. Experimentando sempre materiais novos, descobriu-se que determinadas rochas vulcânicas ofereciam maior resistência à acção da água, doce ou salgada. Utilizava-se, em particular, um material de cor escura, abundante nos arredores de Nápoles (Itália), a que chamaram "Pozzolana" porque se encontrou pela primeira vez nas cercanias de Pozzuoli, junto do vulcão Solfatara. Da mistura destas rochas vulcânicas, que tinham o aspecto da areia, com cal e cascalho, construiu-se o Panteão Romano, o Coliseu, a Basílica de Constantino e outras obras que chegaram aos nossos dias, tendo resistido aos vários agentes destruidores ao longo do tempo.

Segundo Coimbra (1999), Lavoisier anuncia em 1765 uma das primeiras constatações científicas no campo dos ligantes cálcicos: “O gesso seco, após aquecimento, com voracidade capta água e produz uma cristalização rápida e irregular. Os pequenos cristais formam-se muito entrelaçados, resultando numa massa muito dura.”

Em Portugal, a primeira fábrica de cimento surgiu em 1866, segundo parece, localizada em Alcântara. Esta e outras duas que se lhe seguiram, devido a dificuldades económicas e à má qualidade do cimento produzido tiveram vida efémera. Em 1894, foi concedido alvará para a montagem da fábrica de Alhandra, que mais tarde, pelas mesmas razões, teve de ser encerrada, reabrindo em 1912. Em 1906 surge a fábrica de Outão, com o nome de "Compagnie de Ciments du Portugal", sendo em 1918 vendida e dando origem à "Companhia Geral de Cal e Cimento" que, em 1925 aluga as suas instalações à “Sociedade de Empreendimentos e Industrias Limitada”.

Neste momento, operam em Portugal duas empresas cimenteiras, a CIMPOR e a SECIL, que exploram 6 fábricas de cimento, com uma capacidade total de produção de cimento superior a 10 milhões de toneladas/ano.

### 2.2.2. CIMPOR

A “CIMPOR - Cimentos de Portugal, S.A.” foi constituída em 1976, pela integração de antigas empresas cimenteiras de capital privado que foram nacionalizadas. Este grupo cimenteiro português desenvolve as suas actividades em nove países (Portugal, Espanha, Marrocos, Tunísia, Brasil, Angola, Moçambique, Egipto e África do Sul) nas áreas de produção e comercialização do cimento, cal hidráulica, betão e agregados, prefabricação de betão e argamassas secas (CIMPOR, 2005).

O seu objectivo principal é a produção, distribuição e comercialização de cimento, cujas vendas representam cerca de 60% do mercado interno, incluindo as Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores. A capacidade instalada nos 9 países é de 24 milhões de toneladas de cimento por ano, dos quais 7 milhões de toneladas são a capacidade instalada em Portugal (CIMPOR, 2005).

A empresa tem sede em Lisboa e escritórios comerciais no Porto e Coimbra, dispondo em Portugal de 3 fábricas de cimento (em Souselas, Alhandra e Loulé), com uma capacidade de produção conjunta de cerca de 7 milhões de toneladas/ano, e de uma fábrica de cal hidráulica com uma capacidade anual de produção de 200 mil toneladas/ano. Explora directamente uma rede de entrepostos de distribuição de cimento que cobre todo o Território Continental e participa em empresas cimenteiras sedeadas nas Regiões Autónomas, onde dispõe de um centro de moagem nos Açores. Controla ainda uma empresa de fabricação de sacos, destinados à actividade cimenteira. A empresa dispõe também de um importante Centro Técnico (CEDI - Centro Técnico e de Desenvolvimento Industrial), em Lisboa, que vigia a qualidade dos seus produtos e estuda novas instalações, desenvolvendo as técnicas e as competências da empresa (CIMPOR, 2005).

### 2.2.3. Centro de Produção de Loulé da CIMPOR

O Centro de Produção de Loulé (CPL) constitui uma das unidades de produção da Cimpor e encontra-se implantado no centro do Algarve, entre o Barlavento e o Sotavento, mais precisamente no Cerro da Cabeça Alta, 7Km a Oeste de Loulé.

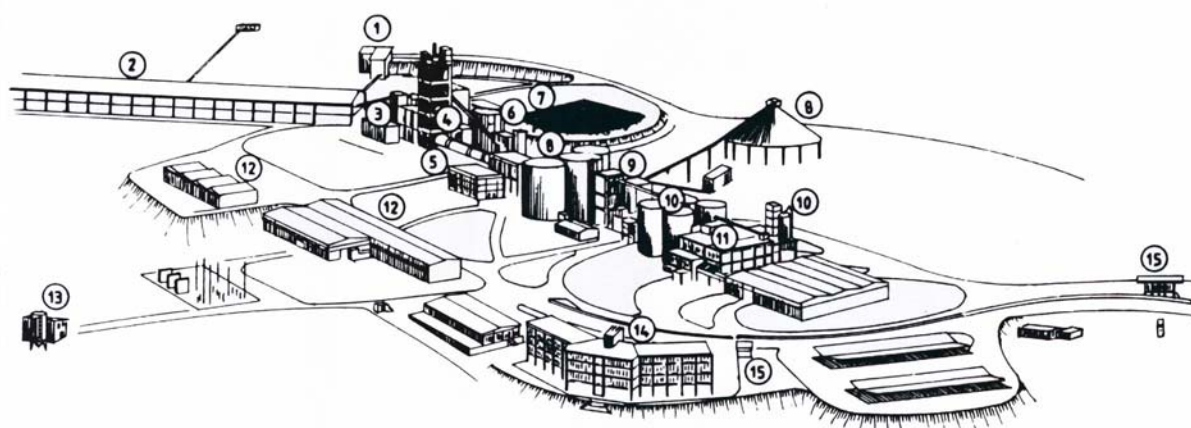
O CPL, teve a sua origem na “Cisul - Companhia Industrial de Cimento do Sul, SARL”, a qual adquiriu à “CLE - Creuseot Loire Enterprise” (França), o projecto e a tecnologia necessária para uma unidade de produção e expedição de cimento. Esta unidade entrou em funcionamento em Setembro de 1973, com uma capacidade instalada de 1000 toneladas/dia de clínquer e 350 mil toneladas/ano de cimento (CIMPOR, 2005). Em 1975, a “CISUL” foi nacionalizada e em 1976, pelo Decreto-Lei nº217-B/76 de 26 de Março é integrada na “Cimpor - Cimentos de Portugal, E.P.”. Em 1983 foi aumentada a capacidade instalada para uma produção de 1500 toneladas/dia de clínquer, conseguida através do redimensionamento do pré-aquecedor e do arrefecedor, da introdução de uma unidade de pré-calcinação e da reformulação de moagem de cru. Em 1985 foi posta em marcha uma nova moagem de cimento de 25 toneladas/hora, e em 1986, em substituição do *fuel-oil*, iniciou-se a queima de carvão betuminoso, o que obrigou à montagem de uma moagem de carvão de 13 toneladas/hora. A partir de 1989 e até à presente data, num processo evolutivo, tem-se procedido à mecanização dos meios de embalagem, pela introdução de um carregador automático de sacos sobre camiões de 100 toneladas/hora, uma unidade de paletização de 100 toneladas/hora e três postos de carregamento a granel, dois de 100 toneladas/hora e um de 200 toneladas/hora. Em Julho de 1996, foi posta em marcha, substituindo a Moagem de Cimento II, a Moagem de Cimento III de 65 toneladas/hora em circuito fechado.

Actualmente, o CPL tem como actividade principal o fabrico e expedição de 3 tipos e classes de cimento e todos estão certificados segundo a Norma UNE 80-301-88.

A capacidade instalada no CPL permite uma produção anual de 800 mil toneladas de cimento. Por outro lado, o clínquer pode também ser expedido como produto final.

Foi uma das primeiras fábricas do País a produzir cimento pelo processo da “via seca” e a primeira a utilizar a técnica da pré-homogeneização na preparação das matérias-primas.

Na figura 2.1, é apresentado um esquema legendado, o qual dá a conhecer os vários sectores da fábrica, a sua disposição e toda a estrutura do Centro de Produção de Loulé.



1. Britagem; 2. Pré-homo; 3. Moagem de cru; 4. Pré-aquecimento; 5. Forno; 6. Moagem de carvão; 7. Parque de carvão; 8. Armazenagem de clínquer; 9. Moagem de cimento; 10. Silos de cimento; 11. Expedição; 12. Oficinas; 13. Estação elevatória de águas; 14. Escritórios; 15. Portarias.

**Figura 2.1 – Esquema do Centro de Produção de Loulé da Cimpor**

Fonte: Cimpor – Manual Técnico

## 2.2.4. Produção e Consumo

O sector do cimento está intimamente ligado ao grau de infra-estruturas dos países, sendo que a importância macroeconómica do sector, a nível mundial, está assim fortemente relacionada com o desenvolvimento económico, com a posição geográfica e com a capacidade competitiva de cada país (Nunes e Godinho, 2001).

O cimento destina-se maioritariamente ao mercado interno de cada país, dadas as suas características, ao seu baixo valor acrescentado e ao facto do custo do seu transporte ser consideravelmente alto (Nunes e Godinho, 2001).

É curioso notar que não são os países com nível de vida mais elevado que apresentam maior consumo de cimento per capita. Tal pode atribuir-se, por um lado,

ao facto das infra-estruturas se depararem praticamente concluídas a partir de um certo nível de desenvolvimento, por outro, à tendência que existe para diversificação de materiais de construção (madeira e aço, principalmente).

Segundo Nunes e Godinho (2001), os Estados Unidos da América (EUA), Japão e a União Europeia dos 15 países membros (UE15) foram na década de 90, responsáveis por cerca de 20% da produção mundial de cimento, sendo os restantes 80% da produção pertencentes, na sua maioria, a países em vias de desenvolvimento. A UE15 representa cerca de 12% do total, sendo os maiores produtores a Alemanha, a Espanha, a França e a Itália. A produção portuguesa corresponde a 0,6% da produção mundial e o consumo tem vindo a aumentar nos últimos anos, comparativamente com os países da Europa Oriental. Roque (2003) refere que a China consome cerca de 50% do cimento mundial, produz mais aço que os EUA e o Japão juntos e tem feito uma deslocação considerável dos seus capitais para a indústria, responsáveis pelo seu crescimento médio anual de cerca de 9%, nos últimos anos.

Segundo Nunes e Godinho (2001), a produção mundial mantém uma tendência para o crescimento, no entanto a longo prazo, o consumo per capita tenderá a estabilizar-se e muito provavelmente o número de empresas a laborar será muito menor, tendendo-se para uma estratégia global.

### **2.2.5. Fabrico do Cimento**

A qualidade do cimento depende tanto da matéria-prima como do processo de fabricação e do equipamento nele empregue.

#### **2.2.5.1. Processos de Fabricação: Via Húmida e Via Seca**

Actualmente, existem três métodos de fabrico dos cimentos: por via húmida, via seca e via semi-húmida.

Alguns anos atrás, devido à natureza das matérias-primas disponíveis e à limitação da tecnologia cimenteira, a utilização do processo por via húmida era praticamente obrigatória. Uma fábrica com este processo consome mais de 100 m<sup>3</sup>/hora de água, para uma produção diária de 500 toneladas. Por outro lado, a necessidade de proceder à evaporação posterior da água de diluição das matérias-primas, obriga a um consumo calorífico de grandes proporções.

A crise energética de 1970 forçou o encerramento ou a transformação das unidades de produção que utilizavam o fabrico por via húmida, optando-se por um processo que prescinde da prévia diluição das matérias-primas em água e que, por isso mesmo, foi designado por via seca.

As operações do processo de produção por via seca, agrupam-se nas seguintes fases:

- Extracção da matéria-prima;
- Preparação, transporte e armazenagem;
- Obtenção do cru;
- Forno e cozedura;
- Moagem.

### **2.2.5.2. Extracção da Matéria-Prima**

A matéria-prima é constituída por uma mistura com proporções bem determinadas, de calcário, marga, xisto ou argila, à qual se adicionam, quando necessário, materiais de correcção, tais como, areia, minério de ferro, bauxite, entre outros.

Existem essencialmente dois métodos de extracção da matéria -prima:

1. A céu aberto, em bancos, e/ou em secções verticais a toda a altura de jazida do minério (pedreiras);
2. Em galerias ou minas nas quais o trabalho se efectua no subsolo.

### **2.2.5.3. Preparação, Transporte e Armazenagem**

O material após a extracção apresenta-se em blocos com dimensões que podem ir até cerca de 1 m<sup>3</sup>. É então necessário reduzir o seu tamanho, através de britadores, a uma granulometria adequada para posterior utilização nas fases seguintes de fabrico.

Numa fábrica de cimento é necessário prever a armazenagem de grandes quantidades de matéria-prima, a fim de evitar perdas de produção e de garantir trabalho em regime contínuo. Essa armazenagem pode ser combinada com uma função de pré-homogeneição.

### **2.2.5.4. Obtenção do Cru**

As matérias-primas seleccionadas são depois depositadas, tendo em consideração a qualidade do produto a obter, o Clinquer, operação controlada através de computadores de processo.

Definida a proporção das matérias-primas, elas são depositadas nos locais de armazenagem e transportadas para moinhos onde se produz o chamado "cru", isto é, uma mistura finamente moída em proporções químicas bem definidas do conjunto das matérias-primas.

### **2.2.5.5. Forno e Cozedura**

Na cozedura do cru, o forno será aquecido até 1500 °C para se formar o Clinquer. A cozedura do cimento pode ser feita em fornos de diversos tipos: contínuos ou intermitentes, fixos ou rotativos, horizontais ou verticais, etc. Até mesmo o forno de Hoffmann, geralmente usado na fabricação de tijolos, já foi empregue na fabricação do cimento.

Hoje em dia, a fabricação do cimento é feita quase exclusivamente no forno rotativo contínuo idealizado por Ramsone. Estes fornos são constituídos por um "tubo" rotativo montado segundo uma inclinação que pode ir de 2,5 a 5%, e com uma velocidade de rotação entre 1,5 e 4 r.p.m., atingindo comprimentos de 85 m. A temperatura necessária para que se desenvolva o processo de cozedura ou clinquerização é cerca de 1500 °C. Obtém-se esta temperatura pela combustão de carvão pulverizado, *pet-coke*, *fuel-oil* ou gás.

O processo de cozedura começa a partir do momento em que o cru é introduzido no sistema de pré-aquecimento, onde circula em contra corrente com os gases resultantes da queima do combustível.

O transporte do material através do forno é feito pelo movimento de rotação deste e pelo o seu grau de inclinação. Às reacções físico-químicas que se desenvolvem durante o processo dá-se o nome de "clinquerização" e ao produto final, clinquer.

Só a partir dos 1450 °C, é que a formação do clinquer se completa, seguindo-se um rápido processo de arrefecimento, primeiro com o encaminhamento da massa (clinquer) para a entrada do arrefecedor e depois através deste.

Para facilitar o arrefecimento, é introduzido ar em contra corrente com o clinquer, aproveitando-se esse ar aquecido para a queima do combustível.

Existem algumas razões pelas quais é exigido um sistema de arrefecimento à saída do forno, que são nomeadamente:

- A evacuação de transporte do clinquer incandescente é na prática impossível;
- O arrefecimento rápido melhora a qualidade do clinquer;
- A recuperação do calor transportado pelo clinquer melhora o rendimento técnico do processo.

Os tipos de arrefecedores mais comuns são os planetários, de grelha e de tambor rotativo. Os transportadores do clinquer têm de ser resistentes à temperatura do clinquer (mais de 200 °C) e conduzem-no para silos ou armazéns horizontais.



### **2.2.5.6. Transformações do Cru até à Formação do Clinquer**

O cru é gradualmente submetido a elevadas temperaturas de cozedura até se dar a clinquerização:

- Até cerca de 100 °C: evaporação de água livre;
- Cerca de 500 °C: desidratação das argilas;
- Cerca de 900 °C: cristalização dos minérios resultantes e decomposição do carbonato;
- De 900 a 1200 °C: reacção de cal com os silicatos e aluminatos;
- De 1280 °C: início da formação dos compostos e do clinquer.

### **2.2.5.7. Reacções Químicas Durante a Cozedura**

Dado a complexidade desta matéria são apenas apresentadas em linhas gerais as reacções químicas que ocorrem no interior do forno rotativo. No entanto poder-se-á encontrar informação mais detalhada em Gomes (1989).

As reacções químicas mais importantes dão-se quando a mistura se encontra no estado pastoso e a temperaturas de um modo geral abaixo de 800 °C formando-se assim o aluminato monocálcico ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaO}$ ); entre 800 e 900 °C forma-se o silicato monocálcico ( $\text{SiO}_2\text{CaO}$ ); entre 900 e 1200 °C aumenta a proporção de óxido de cálcio, formando-se o silicato bicálcico ( $2\text{CaOSiO}_2$ ); entre 1200 e 1300 °C forma-se o aluminato tricálcico e o ferro aluminato tetracálcico ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3 4\text{CaO}$ ); a 1260 °C dão-se as primeiras formações em fusão; entre 1260 e 1460 °C o silicato bicálcico reage com mais uma molécula de cal dando lugar ao silicato tricálcico.

### **2.2.5.8. Moagem**

Até ao arrefecimento o material permanece na forma de pedra extremamente duro (clinker). Chega-se então à última etapa, na qual se obtêm verdadeiramente o cimento.

Ao longo dos tempos foi-se verificando que o clínquer puro, se for moído, dá um cimento de pega muito rápida, podendo endurecer simplesmente com o contacto com o ar. Por isso, antes de moído é adicionado o terceiro complemento do cimento, ou seja, elementos contendo o trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ). Normalmente usa-se o gesso, natural ou artificial na proporção de 2 a 3%.

Depois segue-se a moagem, onde se podem utilizar moinhos verticais ou, mais comumente, moinhos tubulares horizontais com uma, duas ou três câmaras a funcionar em circuito fechado. Utilizam-se separadores para separar as partículas mais grossas, que retomam ao circuito de moagem.

Os materiais são moídos em proporções bem definidas de acordo com o plano de qualidade e de modo a satisfazer as normas específicas em vigor.

Após a moagem, o cimento é armazenado em silos, onde permanece, até ao momento de ensacar ou da expedição a granel.

De todas as operações de fabricação, e principalmente na de moagem, resultam grandes quantidades de poeiras. Para evitar que estas se espalhem, existem aparelhos colectores que as retêm do ar e gases provenientes do processo (despoeiramento). Na grande maioria das fábricas de cimento, esta colecta de poeiras é realizada por sistemas de despoeiramento, através de um processo eléctrico de ionização do ar e do pó.

Na figura 2.2 é apresentado um diagrama, que esquematiza as diferentes operações unitárias conducentes ao fabrico de cimento e que representa o processo de produção do Centro de Produção de Loulé, cuja operação inicial é a britagem e a final é a expedição.

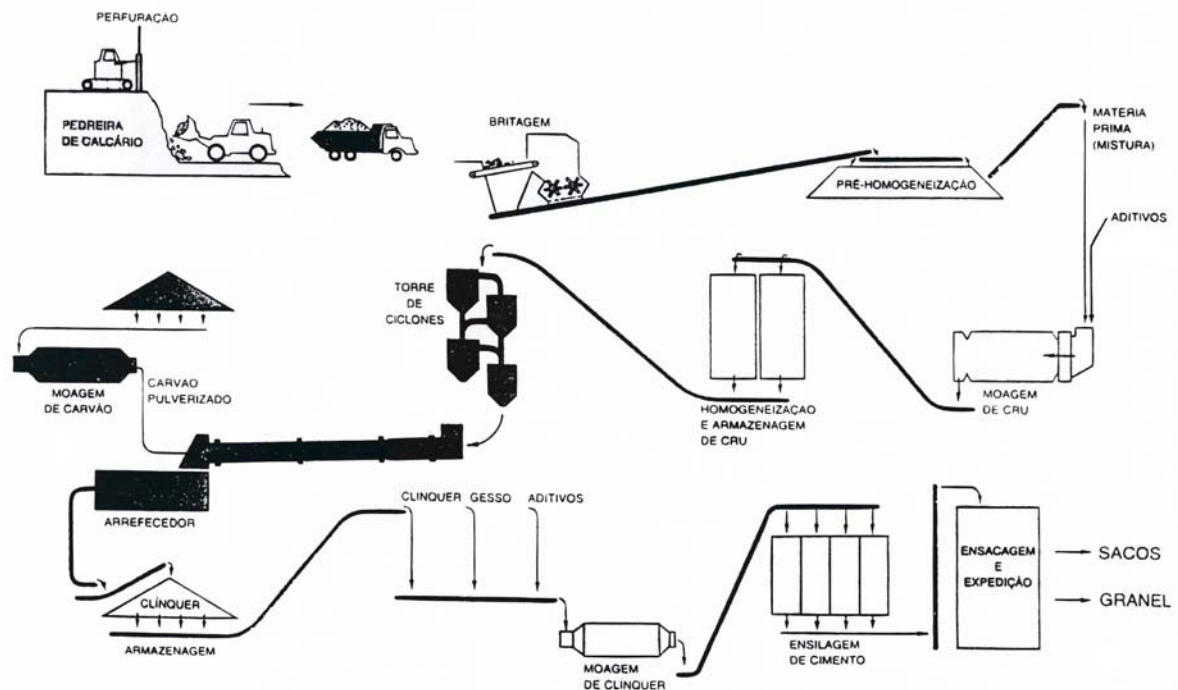


Figura 2.2 – Diagrama do fabrico do cimento

Fonte: Cimpor – Manual Técnico

### 2.2.5.9. Controlo do Processo de Qualidade

As fábricas de cimento dispõem de equipamentos e processos de controlo altamente sofisticados que lhes permitem, a partir de uma sala de comando centralizado, coordenar e controlar todos os equipamentos produtivos garantindo a observação dos limites de segurança e as especificações dos produtos intermédios e finais.

Através de computadores controla-se todo o processo de fabrico. O controlo da qualidade estende-se a todo o processo de fabrico, concentrando-se nas primeiras fases, de tal modo que as acções correctivas podem ser efectuadas antes que as restantes fases do processo e/ou produtos sejam afectados.

### **2.2.5.10. Tipos e Classes de Cimento**

A utilização mais corrente do cimento é na produção de betão, matéria-prima por excelência para a construção de edifícios, pontes, portos, estradas e outras obras públicas.

O betão não é mais do que uma mistura de cimento, água e produtos inerentes, tais como britas e areias. As suas características são determinadas pelas proporções dos elementos constituintes, pela qualidade dos inerentes e, especialmente, pelo tipo de cimento utilizado.

Os tipos e classes de cimentos em Portugal são especificados pelas Norma Portuguesa NP 2064. A característica mais referida dos cimentos é a sua classe de resistência, ou seja, a sua resistência mínima à compressão, após 28 dias de secagem. A NP 2064 apresenta duas classes possíveis, 32,5 e 42,5 MPa, como valores mínimos, e 52,5 e 62,5 MPa, como valores máximos, respectivamente.

Em Portugal fabrica-se também cimento branco (o produto apresenta-se praticamente branco devido ao teor de ferro ser muito baixo).

É de assinalar ainda, a existência de cimento com objectivos especiais, obtidos através da modificação na sua composição ou tratamento térmico, tais como cimento para poços de petróleo.

## **2.3. Manutenção na Cimpor**

A Manutenção, como função dentro das empresas, tem evoluído consideravelmente ao longo dos últimos anos, tanto devido a factores de evolução das técnicas de controlo e melhoramento das condições de trabalho, como a uma crescente evolução na filosofia de gestão das próprias empresas. Neste âmbito, Cholasuke et al. (2004), afirmam que existe um interesse crescente na procura da eficiência da Gestão da Manutenção, por parte da indústria Britânica. A pesquisa relatada em Cholasuke et al. (2004), mostrou que o número de empresas a introduzir uma manutenção proactiva no negócio, aumentou significativamente nos últimos anos.

No entanto, o estudo revelou também que aproximadamente 40% delas (grandes empresa do Reino Unido), ainda não perceberam a importância de uma Gestão da Manutenção eficaz, uma vez que a participação contínua da gestão é rudimentar para fornecer orientação e sentido à função da manutenção.

Um dos avanços mais importantes dentro da Manutenção é sem dúvida o “Serviço de Preparação”. Segundo Cabral (1998), é neste departamento que se estuda o melhor método para executar determinado trabalho e os recursos que devem antecipadamente ser disponibilizados para o executar. Na preparação do trabalho programam-se as acções de manutenção, descrevendo a sequência das operações, materiais e peças a aplicar, ferramentas a utilizar, especificações a cumprir, quantidade e qualidade dos materiais, normas de segurança e tempos previstos de execução. As acções de manutenção têm de ser conducentes com a minimização de riscos no que concerne à segurança de pessoas e equipamentos. Os trabalhos planeados pelos Serviços de Preparação devem ter objectivos partilhados com a produção, tais como, melhoria das condições de produção, aumento de produtividade e garantia da qualidade do produto. Cabral (1998) refere que a manutenção é um factor indissociável da qualidade cujo controlo se situa, cada vez mais, a montante do produto final, isto é, ao nível do equipamento que o produz.

Na “CIMPOR, Indústria de Cimentos, S.A.”, o planeamento de todas as acções de manutenção é realizado pelo Gabinete de Preparação o qual faz parte do Departamento de Manutenção.

### **2.3.1. Planeamento da Manutenção e Preparação no CPL**

O planeamento da manutenção no CPL, tal como, na maioria de outras instalações industriais, é um trabalho exigente e assume um papel determinante na garantia do bom funcionamento dos sistemas.

A elevada complexidade dos sistemas, para além do grande número de equipamentos que os compõem, impõe também uma complexa tarefa de preparação das acções de manutenção a executar.

No CPL, é realizada anualmente uma paragem geral (toda a fábrica), com o objectivo de realizar inspecção geral, manutenção preventiva, limpezas, substituição de componentes e em alguns casos alteração do processo, denominada por “Grande Reparação”.

Para além do descrito no parágrafo anterior é também praticada uma manutenção contínua, tanto correctiva como preventiva, assegurando a correcta funcionalidade dos equipamentos e sistemas durante os tempos de produção.

Pretende-se nos próximos pontos descrever as práticas de manutenção, capacidades e, de um modo geral, elucidar como é planeada a Gestão da Manutenção no CPL:

- As rotinas de manutenção programada são realizadas em sintonia com a “Produção” e as equipas de manutenção actuam periodicamente nos equipamentos, de acordo com planos de manutenção elaborados pela “Preparação”;
- São realizadas rotinas de inspecção estabelecidas fundamentalmente, pela informação fornecida pelos fabricantes dos equipamentos, bem como, através da experiência acumulada pelos técnicos de manutenção;
- São realizadas rotinas de lubrificação baseadas nos elementos dos fabricantes dos equipamentos e nas necessidades detectadas à priori, fazendo cumprir os planos de lubrificação estabelecidos;
- Algumas acções de manutenção, como é o caso de algumas lubrificações, são executadas por empresas exteriores subcontratadas. O CPL recorre muitas vezes ao *outsourcing* como forma de gerir determinados custos fixos;
- São utilizadas algumas técnicas avançadas no que diz respeito à manutenção condicionada, tais como: termografia por infravermelhos, análise de vibrações, controlos não destrutivos e análise de lubrificantes;
- Determinadas reparações de elevada envergadura são executadas por empresas externas contratadas, com o *know-how* para tal, evitando custos

fixos de mão-de-obra especializada e custos de aquisição e conservação com equipamentos auxiliares, como é o caso de ferramentas específicas;

- As acções de manutenção correctiva, na sua maioria, são realizadas pelas equipas de manutenção do CPL, embora sempre que necessário se recorra a empresas externas para a prestação de serviços mais especializados e cuja garantia de execução pelos técnicos do CPL não seja assegurada;
- O treino das equipas de manutenção é o decorrente da actividade do dia a dia da manutenção. O plano de formação deveria ser mais especializado e prático e incidir sobre áreas de intervenção e ocorrência do CPL. A formação é diversificada e, é em muitos caso, dada pelos fabricantes dos equipamentos;
- Em termos de *stock* de peças e equipamentos de substituição, é apenas acautelado o mínimo necessário para dar cobro às ocorrências previstas, e deste modo, não se suportarem custos de conservação demasiado elevados e injustificáveis;
- Nem todas as ocorrências de avarias são registadas, constituindo apenas histórico, as ocorrências consideradas mais importantes. Para além disso, o registo não é detalhado e o sistema informático não permite uma consulta funcional para análise e pesquisa de dados pretendidos. Embora, seja preocupação do departamento de manutenção realizar alguma modernização no sistema informático de registo de dados;
- Não é prática usual, a análise detalhada do histórico das avarias, no entanto, são verificadas com mais detalhe as avarias que ocorrem nos equipamentos com mais frequência ou cujo impacto na actividade produtiva, revele maior preocupação, passando então a ser estudada a causa da avaria com o objectivo de incrementar melhorias ao equipamento;
- Existe uma relativa facilidade no acesso à informação técnica existente, tanto em sistemas informáticos, como em formato de papel. Informação essa, fornecida pelos fabricantes dos equipamentos, como também, criada e

produzida pelo próprio CPL. Existe alguma preocupação na actualização de alguns desenhos, esquemas, diagramas, *Layouts* ou mesmo sinópticos elucidativos. Sempre que necessário, são criados documentos técnicos que relatam alterações ou substituições de equipamentos no processo;

- Em termos gerais a informação existe, mas na sua maioria encontra-se dispersa e não está correctamente organizada. A acessibilidade à informação em sistemas informáticos, não permite uma boa prática no planeamento da manutenção;
- Embora se recorra aos dados do histórico, a sua análise é mais vocacionada para o campo da gestão e da produção, pecando-se de certo modo na não optimização da manutenção;
- Nos últimos 3 anos, foi criada e mantida uma relação de *Benchmarking* entre a CIMPOR e algumas empresas cimenteiras estrangeiras, cujos resultados têm vindo a alargar alguns horizontes, nomeadamente na área da Manutenção.

## **2.4. A Fiabilidade no Sistema de Cozedura**

O objectivo principal de uma empresa é gerar lucros. Logo as vantagens económicas alcançadas por uma correcta Gestão da Manutenção dos meios produtivos são um argumento válido para um interesse crescente no seu desempenho. O desempenho pobre da máquina, os tempos mortos (*downtime*) e a ineficácia da manutenção na fábrica, conduzem à diminuição no lucro, perda de produção e perdas de oportunidades no mercado (Cholasuke et al., 2004). Consequentemente, a razão final para a Gestão da Manutenção é a de maximizar o lucro do negócio e oferecer vantagem na competição (Willmott, 1994; Levitt, 1997; Wilson, 1999 e Kutucuoglu et al., 2001, citado por Cholasuke et al., 2004).

Cabral (1998) refere na sua obra que, os objectivos da manutenção industrial têm que ser ligados aos objectivos da empresa, uma vez que, a manutenção afecta a



rentabilidade do processo produtivo, tanto no volume e qualidade da produção como também no seu custo. Por um lado, melhora o desempenho e a disponibilidade do equipamento, mas por outro, acresce aos custos de funcionamento.

A Gestão da Manutenção tem um papel fundamental, encontrar o ponto de equilíbrio entre benefício prestado e custo inerente. A rentabilidade da empresa será acrescida desde que o contributo positivo da manutenção supere o seu aumento de gastos. Importa sublinhar, que a não-manutenção ou trabalhos de manutenção mal sucedidos, trará consequências ao processo produtivo e imputará custos posteriormente (Pinto, 1995). As vantagens da manutenção podem ser encontradas quando a consequência da sua correcta actuação, resulta na observação de falhas que não aconteceram, mas que teriam ocorrido se não tivessem sido tomadas as medidas preventivas. Poder-se-á conceber que a manutenção é um investimento, já que os custos suplementares serão recuperados várias vezes com o aumento da disponibilidade do equipamento (Souris, 1992).

É necessário avaliar quais os equipamentos mais críticos e preocupantes a nível da manutenção. A dificuldade consiste em repartir de forma eficaz as várias acções de manutenção preventivas ou condicionadas em função do nível das correctivas (Souris, 1992). A manutenção preventiva não pode ser decidida meramente ao acaso, terá de ser planificada com base em provas de necessidade, tendo em conta os custos e o conhecimento dos seus efeitos (Souris, 1992). A eficácia da manutenção será mais consistente se for conjugada com outros intervenientes da empresa, nomeadamente da produção. Segundo Souris (1992), o fabrico e a manutenção são duas actividades opostas e complementares. Esta dualidade é possível de justificar pela polivalência das equipas de manutenção que são normalmente capazes de tratar causas de avarias, cujas origens se enquadram também nas regras da lógica da produção.

Para muitas organizações é importante responder à pressão competitiva global, procurando aumentar as suas produtividades, maximizando a eficácia total do equipamento e assegurar um programa de manutenção eficaz (Cholasuke et al., 2004). Um nível aceitável do desempenho da indústria é simplesmente inatingível sem uma sustentação eficaz da Gestão da Manutenção (Cholasuke et al., 2004).

A Gestão da Manutenção praticada na fábrica do CPL tem optimizado ao longo dos anos o seu planeamento, o que tem sido determinante para assegurar a continuidade da produção, garantia de qualidade do produto e satisfação do mercado em que se insere.

No entanto, no sistema de cozedura do cimento, habitualmente referenciado na indústria cimenteira simplesmente como forno, tem ocorrido um elevado número de paragens imprevistas. Tais ocorrências, consideradas preocupantes pela produção, têm vindo a diminuir drasticamente o índice de Disponibilidade Média e Fiabilidade do sistema. A situação agrava-se ainda mais, uma vez que as intervenções durante estas paragens para reposição do sistema são demasiado prolongadas. Comparativamente a outras unidades de produção de cimento do grupo CIMPOR, os valores dos índices supracitados, no CPL são mais altos. O mesmo acontece comparativamente com fábricas de outros grupos cimenteiros nacionais e estrangeiros. Este assunto tem sido debatido pelos técnicos do CPL incansavelmente, na tentativa de solucionar o problema. Em causa estão perdas de produção significativas associadas a custos de não-produção preocupantes.

Como forma de ilustrar o problema, segundo a perspectiva da produção, é apresentado na figura 2.3 um diagrama que pretende de forma inteligível, quantificar o fluxo de matéria processada pelos 5 sectores distintos da fábrica que completam o processo de fabrico do cimento no CPL. Os valores enunciados no diagrama são referentes à média do caudal de matéria processada pelos equipamentos durante o ano de 2003.

Analisando o diagrama de fluxos, poder-se-á identificar o forno como o principal “funil” ou “gargalo” do processo de fabrico. Importa referir que o caudal máximo de clínquer à saída do forno, em condições normais, é de 81,25 toneladas/hora. O caudal máximo de alimentação ao forno é de 140 toneladas/hora de farinha, no entanto ocorrem perdas no processo de cozedura (+/- 42%), originadas pela libertação de CO<sub>2</sub>, que é expulso do processo. Contudo, segundo a produção, o resultado das perdas têm ocorrido segundo uma proporção normal, relativamente à quantidade de farinha que tem alimentado o forno.

Devido ao elevado número de paragens por falha deste sistema de cozedura, a média do seu caudal à saída, ronda as 73,7 toneladas/hora, ficando em défice relativamente ao potencial caudal que lhe é fornecido pelos sistemas a montante. A jusante do forno, ressentem-se que o este poderia produzir mais. Existe uma perda de produção significativa, devido à baixa disponibilidade do forno para a produção.

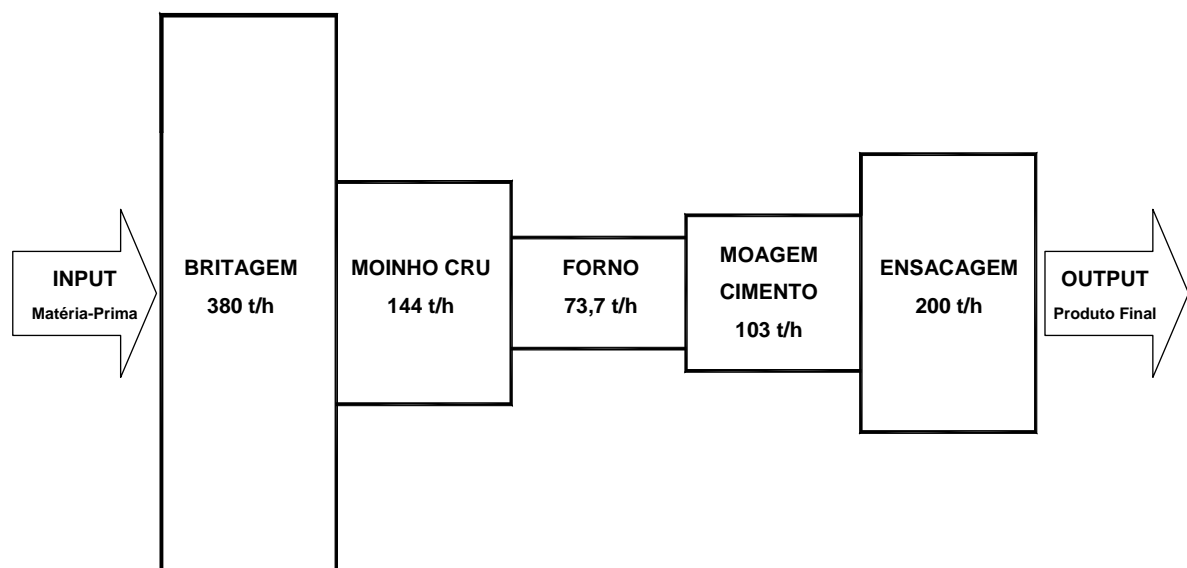


Figura 2.3 – Diagrama de fluxo do fabrico de cimento no CPL, ano de 2003

O problema apresentado é uma das razões, a que está associado o baixo índice de disponibilidade e Fiabilidade do CPL. O âmbito do problema está direccionado tanto para a manutenção como para a produção e cabe às duas áreas equacionar soluções eficazes que venham a diminuir o número de paragens inesperadas.

A presente investigação tem como objectivo verificar, por meios científicos, o comportamento do sistema de cozedura do cimento em termos de taxa de falhas e disponibilidade, grandezas estas que interferem na sua Fiabilidade. Tirar conclusões e apurar resultados que contribuam para uma análise das causas e motivos que levaram o sistema a falhar. Avaliar e ajustar as acções de manutenção correctiva e preventiva a implementar nos equipamentos mais críticos.

Pretende-se também, facilitar um conjunto de metodologias, cuja implementação, contribua para uma sustentação eficaz da Gestão da Manutenção no alcance de

melhorias do desempenho de equipamentos, tendo em vista a minimização dos riscos de falha e consequentes perdas de produção.

### 2.4.1. Sistemas e Equipamentos em Estudo

Os equipamentos a estudar, que constituem o sistema de cozedura de cimento, estão contidos em três subsistemas fundamentais, sendo eles: torre de pré-aquecimento, forno e arrefecedor.

A torre de pré-aquecimento, denominada também por torre de ciclones, é constituída por 4 ciclones colocados sequencialmente em vários andares, cuja função é unicamente fornecer um pré-aquecimento gradual à matéria, o cru, antes de entrar no forno. A fonte de calor, são os gases provenientes do forno. É neste estágio que começa a cozedura do cru que circula em contra-corrente com os gases provenientes da queima de combustível no forno (Coimbra, 1999).

O forno é um equipamento tubular, rotativo, relativamente comprido, montado segundo uma ligeira inclinação. É revestido no interior por materiais refractários (tijolos) que conferem protecção necessária ao tubo, uma vez que se atingem temperaturas cerca dos 1500°C, servindo também como redutor das perdas térmicas para o exterior. No interior do forno existe um queimador (tubeira) que é adaptada consoante o tipo de combustível que se deseja queimar (*fuel-oil*, carvão ou *pet-coke*). No forno é realizada a cozedura propriamente dita do cru, dá-se a clinquerização em contracorrente com a chama e obtêm-se o clinquer (Coimbra, 1999).

O arrefecedor (arrefecedor de grelhas móveis) situa-se à saída do forno e é constituído por tapetes de grelhas metálicas que transportam o clinquer. Em contracorrente, circula ar injectado por ventiladores, cuja função é provocar o arrefecimento mais ou menos brusco do clinquer proveniente do forno, e alimentar a queima do forno. O clinquer arrefecido é transportado seguidamente para os silos de armazenamento (Coimbra, 1999).

A figura 2.4 mostra um esquema simplificado do sistema de cozedura do CPL, onde se podem observar os três subsistemas que o compõem.

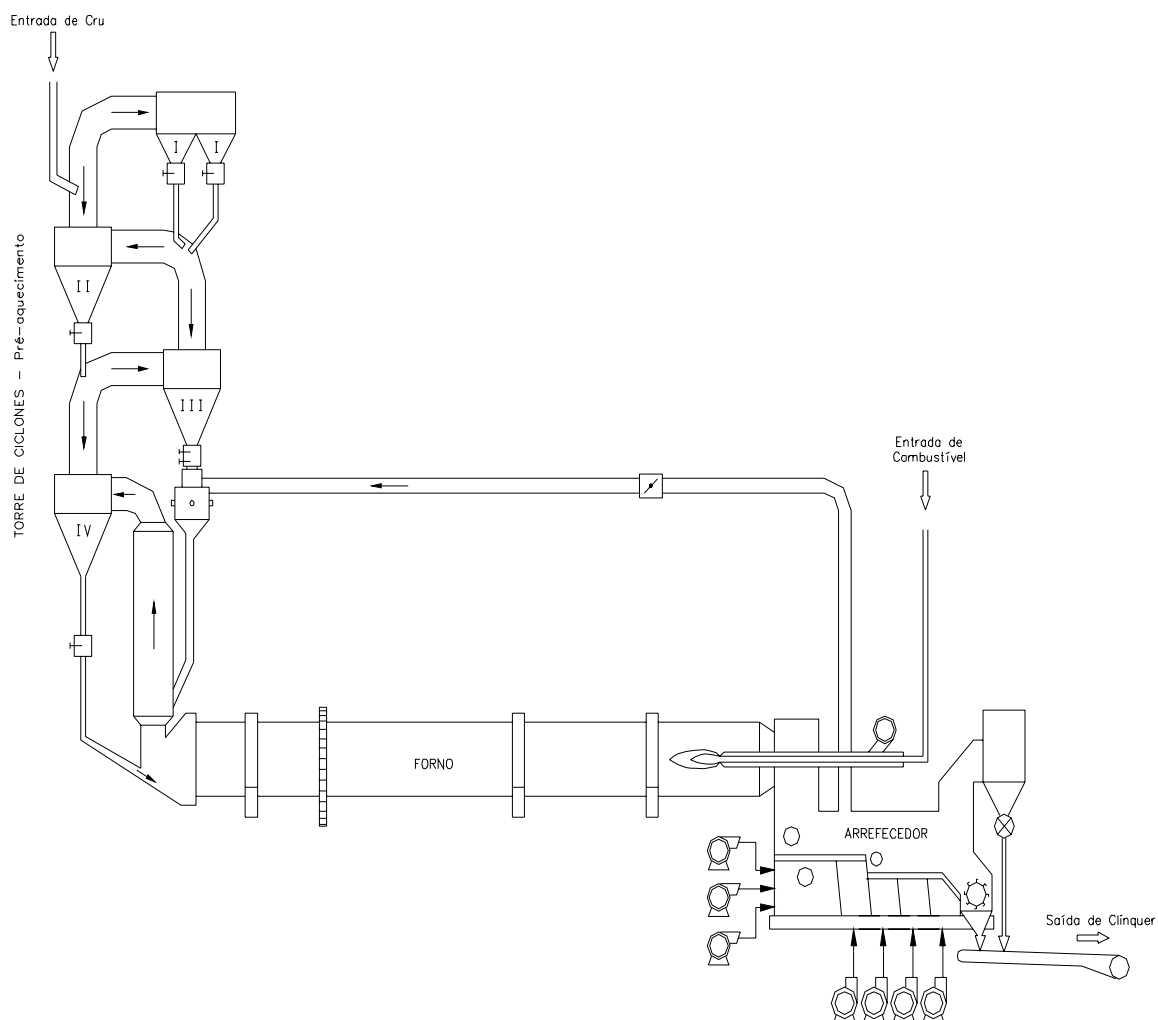


Figura 2.4 – Esquema simplificado do sistema de cozedura do CPL

No anexo I é apresentado um esquema pormenorizado e devidamente legendado do sistema de cozedura do Centro de Produção de Loulé. O anexo I contém também algumas fotografias que ilustram o equipamento em causa pretendendo possibilitar uma melhor visualização da realidade e uma percepção da dimensão dos mesmos.

A secção 2.2.5 Fabrico de Cimento, deste capítulo, explica sucintamente o processo do fabrico do cimento, de forma elucidativa à compreensão do funcionamento do sistema que se pretende estudar. Também, na secção 4.3 Descrição das Causas de

Paragem do Forno, no capítulo 4, para além, da descrição e interpretação das falhas que ocorrem nos equipamentos do sistema, é feita uma descrição mais detalhada de cada equipamento para a devida compreensão das suas funcionalidades.

# CAPÍTULO 3

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Introdução

Manutenção é uma actividade realizada sobre um sistema reparável, de tal forma que este desempenhe as suas missões correctamente ou, aumente a sua disponibilidade, Fiabilidade e segurança.

Este capítulo é exclusivamente dedicado à revisão bibliográfica, procurando referenciar de forma abrangente conteúdos e metodologias necessárias ao desenvolvimento deste estudo. Na sua maioria, os aspectos focados foram utilizados nesta dissertação e houve sempre a preocupação em recorrer a publicações científicas, fontes fidedignas e actuais para a recolha de elementos.

Pretende-se enquadrar a Manutenção no contexto actual, definir os principais conceitos e mais pormenorizadamente, apresentar modelos estatísticos mais utilizados na análise de falhas e da disponibilidade dos equipamentos.

Com este capítulo pretende-se também, apresentar um conjunto de metodologias tipicamente mais utilizadas na análise de sistemas reparáveis e actualmente considerados mais exactos.

Assim, atendendo ao âmbito do presente estudo, a revisão bibliográfica centrou-se essencialmente na pesquisa de metodologias a utilizar na análise e modelação das falhas do sistema de cozedura.

### 3.2. Manutenção no Contexto Actual

Desde o início do século XX, com a evolução das técnicas de produção, evidenciada pela automatização dos sistemas, a Manutenção tem cada vez mais um papel fundamental no seio dos meios produtivos.

A Manutenção tem vindo a ser encarada, nos últimos anos, como uma das funções que, sendo optimizada, poderá contribuir cada vez mais para os resultados da actividade das empresas (Canuto, 2002). É sem dúvida impreterível pensar que a Manutenção é nos dias de hoje uma actividade técnica de enorme relevo e importância na vida económica das indústrias e empresas.

Nas últimas décadas tem-se verificado uma enorme pressão em todas as organizações industriais no sentido de serem mais competitivas no mercado mundial (Julião e Greenough, 2003). Neste contexto, a Manutenção desempenha um papel importantíssimo visto ser determinante para garantir a disponibilidade dos equipamentos e influenciar de forma significativa o nível de qualidade dos bens produzidos, tal como os custos de produção.

A qualidade representa actualmente uma das principais preocupações das empresas. A contribuição da Manutenção no desempenho e na rentabilidade dos sistemas de produção é a de assegurar que a fábrica execute de acordo com as condições especificadas ou com as que a organização espera alcançar, equilibrando os seus recursos e *outputs* (Cholasuke et al., 2004).

Segundo Julião e Greenough (2003), o principal objectivo da função Manutenção é reduzir os tempos de paragem, pois têm um impacto significativo na produtividade das organizações. Para reduzir os tempos de paragem, a Manutenção tem de ser capaz de prever falhas, de proporcionar reparações eficazes e eficientes, de modo a reduzir o tempo de intervenção.

No contexto da Gestão da Manutenção Industrial, têm sido desenvolvidas novas técnicas e filosofias com o objectivo de optimizar a utilização dos recursos, aumentando o potencial efectivo dos meios de produção. Segundo Dias et al. (1999), a Gestão da Manutenção deve ser entendida não como uma obrigação dos



serviços de Manutenção de uma empresa mas, como uma actividade essencial para o aumento da qualidade e produtividade. Neste âmbito surge uma nova filosofia denominada por Manutenção Produtiva Total (TPM - *Total Productive Maintenance*).

O TPM é uma filosofia de Manutenção cujo objectivo é o contínuo melhoramento, estando subjacente a colaboração entre equipas dentro da empresa. Tsang e Chan (2000) referem que a implementação do TPM implica uma mudança radical na cultura organizacional das empresas, nomeadamente, uma redefinição de regras nas operações da produção e da Manutenção. Neste contexto, Cigolini e Turco (1997) referem a necessidade de obter a motivação e a participação dos colaboradores fabris em todas as funções da empresa, eliminando o dualismo entre produção e Manutenção. Smith e Hawkins (2004) acrescentam que o TPM é baseado na Manutenção proactiva e envolve todos os níveis e funções da organização, desde os executivos de topo até aos colaboradores fabris.

A metodologia TPM assenta sobretudo no estabelecimento de um sistema global de Manutenção Produtiva com objectivos que maximizem a eficácia da instalação, devendo para tal obter o envolvimento de todos os elementos da empresa e a todos os níveis. Segundo Tsang e Chan (2000), o TPM é um método inovador para a Manutenção, o qual assegura um potencial e eficiente aumento de vantagens para a produção. A aplicação do TPM permite à empresa melhorar e aumentar a sua produtividade tal como a sua qualidade de forma notável.

Tsang e Chan (2000) afirmam que a metodologia TPM tem provado ser eficaz para a optimização da eficiência do equipamento e na eliminação de falhas. Actualmente, as vantagens da implementação do TPM foram reconhecidas e este envolve os processos industriais de praticamente todo o Mundo (Cigolini e Turco, 1997).

Em Dias et al. (1997a) abordam-se alguns modelos estatísticos possíveis de utilizar na área do TPM. Segundo os autores que com o conhecimento da evolução do número de falhas no tempo e a sua ordem cronológica é possível avaliar o comportamento de sistemas reparáveis, e consequentemente, aplicar modelos que permitam uma tomada de decisão em termos de TPM.

O TPM como filosofia de gestão encontra-se aplicado em algumas empresas. No entanto, nem sempre, a sua utilização está baseada em modelos estatísticos de apoio à Gestão da Manutenção. Em muitas situações, o simples cálculo do tempo médio entre falhas, não considera a ordem cronológica das mesmas, pelo que não é possível avaliar o comportamento do sistema na sua globalidade nem prever a melhor política de substituição preventiva de componentes.

### **3.3. Definição dos Principais Conceitos**

Com base em publicações de diversos autores portugueses e estrangeiros, pretende-se neste sector expor diversos conceitos que se consideram de importância relevante para o tema a tratar. Esta abordagem, apesar de não ser exaustiva, procura enquadrar os conceitos mais vulgarmente utilizados na área da Gestão da Manutenção.

#### **3.3.1. Manutenção**

A Manutenção constitui um conjunto de acções empreendidas com o objectivo de repor o sistema avariado nas condições operacionais de novo (Assis, 1997).

Ferreira (1998) apresenta a definição de Manutenção, segundo a AFNOR, como sendo um conjunto de acções que permitem manter ou restabelecer um bem num estado ou com possibilidade de assegurar um serviço determinado.

A Manutenção é uma combinação das acções e técnica aplicadas aos bens (sistemas, equipamentos e/ou instalações), para a optimização dos seus ciclos de vida, isto é, todas as acções necessárias para manter, ou reparar um sistema de modo a restaurar a sua condição inicial de bom funcionamento.

Cabral (1998) define a Manutenção como o conjunto das acções destinadas a assegurar o bom funcionamento das máquinas e das instalações, garantindo que elas são intervencionadas nas oportunidades e com alcances certos, por forma a

evitar que avariem ou baixem de rendimento e, no caso de tal acontecer, que sejam repostas em boas condições de operacionalidade com a maior brevidade, tudo a um custo global optimizado.

Dias (2002) apresenta a Manutenção como uma actividade realizada sobre um sistema reparável, de tal forma que este desempenhe as suas missões correctamente ou, aumente a sua disponibilidade, Fiabilidade e segurança.

Os objectivos da Manutenção Industrial têm de ser ligados aos objectivos globais da empresa, uma vez que a Manutenção afecta a rentabilidade do processo produtivo, influenciando, tanto o volume e a qualidade da produção, como o seu custo. Segundo Cabral (1998), o conjunto das acções destinadas a encontrar e a situar o nível da Manutenção num ponto de equilíbrio entre o benefício e o custo, que maximize o contributo positivo da Manutenção para a rentabilidade geral da empresa, constitui a Gestão da Manutenção.

Pinto (1995) sintetiza o conceito de Gestão da Manutenção como o conjunto das técnicas que podem contribuir para uma melhoria significativa da produtividade e eficiência do Departamento de Manutenção.

Considerando as perspectivas dos vários autores, poder-se-á referir que a Manutenção é, no presente, uma actividade de elevada complexidade e para a qual é necessária uma elevada especialização quer na sua componente *Soft*, quer na sua componente *Hard*. Assim, pode-se resumir a função Manutenção como um conjunto de metodologias estatísticas (componente *Soft*) que nos permitem programar e realizar as acções de técnicas Manutenção (componente *Hard*) com a periodicidade mais adequada à rentabilização do sistema reparável.

#### **3.3.1.1. Função da Manutenção**

O modelo de Manutenção a adoptar deverá ser em função das características da instalação industrial, devendo ser coerente com os equipamentos existentes e com a sua exploração.

Qualquer equipamento, sistema ou instalação, seja ele mecânico, eléctrico/electrónico, hidráulico ou pneumático, está sempre sujeito a um processo progressivo de degradação, em consequência da utilização ou até por causas fortuitas. Isto requer que sejam efectuadas reparações, inspecções, rotinas preventivas, substituições de órgãos ou peças, mudanças de óleo, limpezas, correcção de defeitos, fabricação de componentes, pinturas, etc., para que se possa repor os níveis de operacionalidade. Este conjunto de acções forma o leque de actividades, ou a missão, da Função Manutenção (Pinto, 1995).

Embora as actividades do serviço de Manutenção variem com a dimensão e o tipo de empresa, bem como a política adoptada, segundo Pinto (1999), é possível agrupar essas actividades em duas áreas funcionais:

- Funções primárias, que estão relacionadas com o trabalho diário efectuado pelo serviço de Manutenção. As funções primárias incluem a Manutenção dos equipamentos e instalações, incluindo as tarefas de planeamento, programação e controlo dos trabalhos de Manutenção, quer seja na elaboração de planos ou na emissão de ordens de trabalho, tendo ainda a função técnica do estudo dos processos de avarias no equipamento, a elaboração de registos históricos, a determinação de custos, a gestão e formação do pessoal afecto ao serviço, entre outros. As funções primárias incluem ainda a inspecção, lubrificação e limpeza dos equipamentos, a instalação de novos equipamentos e a participação na sua concepção e construção;
- Funções secundárias, que são adjudicadas ao serviço por razões de experiência precedente ou outras. Alguns exemplos de funções secundárias são os estudos e projectos, a protecção e segurança industrial, a higiene e segurança no trabalho, controlo das fontes de poluição, entre outros.

Os objectivos da função Manutenção são os de melhorar a Fiabilidade dos equipamentos, diminuindo o número de avarias verificados, melhorar a manutibilidade dos equipamentos, diminuindo os tempos de reparação e consequentemente, aumentar a disponibilidade.

### 3.3.1.2. Classificação da Manutenção

Existem essencialmente dois tipos de intervenções de Manutenção: Manutenção correctiva e Manutenção preventiva (Pinto, 1999). Na realidade numa percentagem significativa das indústrias continuam a prevalecer as intervenções com carácter correctivo, quer porque nem todas as avarias são previsíveis ou susceptíveis de serem evitadas, quer por falta de implementação de metodologias de análise de histórico de falhas que permitam uma Manutenção de carácter preventivo.

A Manutenção tem registado uma grande evolução do ponto de vista orgânico. Foram criadas filosofias e metodologias de trabalho que, com a sua evolução, possibilitaram classificar os diferentes tipos de intervenção na actividade da Manutenção. A figura 3.1 representa a classificação dos diferentes tipos de Manutenção na actualidade mais evidenciados.

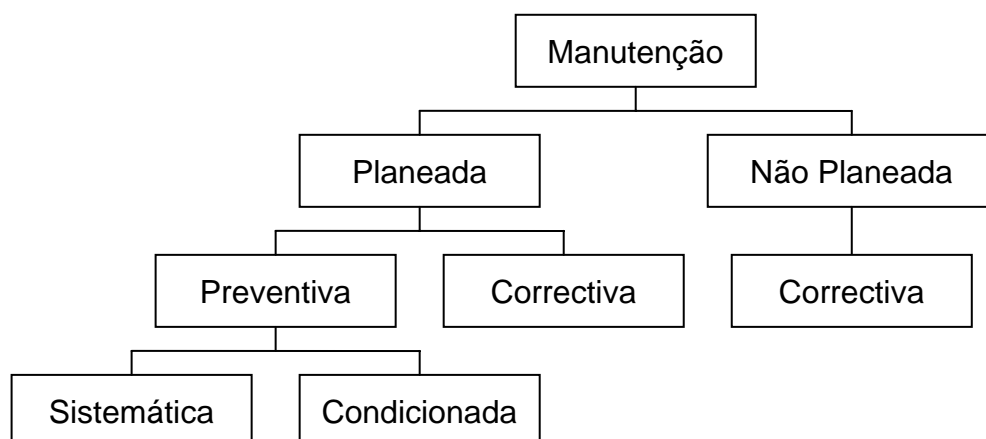


Figura 3.1 – Classificação dos tipos de Manutenção

Quanto à forma de actuar perante uma determinada avaria ou anomalia, as intervenções da Manutenção podem ser não planeadas, se as avarias ocorrem de forma imprevista, ou planeadas quando o equipamento permite o planeamento das acções de Manutenção para o momento mais oportuno.

A Manutenção correctiva, tal como o seu nome indica, tem por objectivo a correcção de avarias ou deficiências do sistema. Quando ocorre, na maioria dos casos, não é

programada e na maioria das situações é a forma mais tradicional de fazer Manutenção (Dias, 2002).

A Manutenção correctiva é o conjunto das actividades realizadas após a ocorrência de uma avaria ou degradação do sistema, para desempenhar a função requerida. A Manutenção correctiva compreende a localização da avaria e o seu diagnóstico, a reposição do funcionamento com ou sem modificação e o controlo de bom funcionamento. Dias (2002) refere que para acções de Manutenção correctiva em equipamentos de laboração contínua, é exigido um esforço adicional da equipa de Manutenção pois, normalmente, obriga a meios de intervenção nem sempre disponíveis no momento da falha. As acções de Manutenção correctiva deverão ser reduzidas ao mínimo através da racional gestão e planificação das tarefas de Manutenção.

A Manutenção preventiva é realizada em intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos. Ferreira (1998) considera que a Manutenção preventiva pressupõe a intervenção do serviço de Manutenção num momento devidamente preparado e programado antes da data provável do aparecimento de uma avaria. Um programa de Manutenção preventiva deverá ser definido com o objectivo de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do sistema ou do serviço por si prestado. Pinto (1995) refere que o conceito de Manutenção preventiva fundamenta-se no estudo da Fiabilidade dos equipamentos. Dias (2002) refere que a Manutenção preventiva tem sido reconhecida como uma actividade extremamente importante para os sistemas em geral pois, para além de reduzir os custos de Manutenção, permite aumentar a Fiabilidade do sistema.

Existem essencialmente dois tipos de Manutenção preventiva, compreendidos também como tipos de Manutenção:

- Manutenção sistemática, que segundo Ferreira (1998), é uma Manutenção preventiva efectuada segundo um plano estabelecido segundo o tempo ou número de unidades de utilização, tendo por objectivo manter o sistema num estado de funcionamento equivalente ao inicial. As intervenções sistemáticas deverão ser programadas, tendo em atenção os dados do fabricante do

equipamento e os resultados operacionais evidenciados. Contudo, Xia (1998) refere que se a Manutenção preventiva for executada com demasiada frequência os sistemas perderão disponibilidade para a produção, o que contribui para consequentes perdas de produção. Assim, a preocupação principal no planeamento da Manutenção preventiva deverá ser determinar os intervalos óptimos para as acções de Manutenção preventiva;

- Manutenção condicionada é um tipo de Manutenção subordinada à evolução de parâmetros e condições funcionais de um determinado equipamento ou sistema para decidir o momento de uma determinada intervenção. Neste tipo de Manutenção (Ferreira, 1998), a decisão de intervenção preventiva é tomada quando existe evidência experimental de avaria iminente ou que se aproxima do limite de degradação admissível pré-determinado. Segundo Cabral (1998), o sucesso deste tipo de Manutenção depende da eficácia dos recursos e da metodologia para vigiar o estado do equipamento e a sua funcionalidade dentro dos limites aceitáveis. Pinto (1995) refere que este tipo de Manutenção obriga, em geral, à aplicação de aparelhagem complexa e bastante dispendiosa que, dificilmente, as empresas conseguem rentabilizar, exceptuando nas empresas de grande dimensão em que se justifica economicamente a aplicação de tal aparelhagem. Muitas empresas subcontratam este tipo de Manutenção para determinados equipamentos, pois nem sempre é justificável para a totalidade dos equipamentos (ex: medição e análise de vibrações, análise de óleos lubrificantes, termografia, entre outros). Esta Manutenção é por vezes designada Manutenção baseada na condição.

Em Xia (1998) é descrita uma outra modalidade da Manutenção denominada por oportunista. Poder-se-á descrevê-lo como um caso especial da Manutenção preventiva mas, executada perante uma intervenção correctiva. Para Xia (1998), a Manutenção oportunista é um tipo especial de Manutenção preventiva que é executada quando outros sistemas ou equipamentos estão submetidos a acções de Manutenção correctiva ou preventiva. Este tipo de Manutenção é normalmente

praticado em sistemas de laboração contínua, de modo a garantir a sua maior disponibilidade para a produção.

O termo conservação deverá ser diferenciado de Manutenção. No entanto, para muitas empresas não existe qualquer distinção entre estes. Poder-se-á definir conservação como o conjunto de acções destinadas a manter os bens armazenados em condições de operacionalidade. Este termo deve empregar-se para referir a Manutenção dirigida ao material em armazém, seja ele um equipamento ou uma peça de reserva. Utiliza-se mais genericamente o termo Manutenção para o parque de máquinas e instalações em funcionamento. No entanto, Ferreira (1998) estabelece uma distinção entre os dois termos (Manutenção e conservação), com base numa evolução de conceito, que divergem do raciocínio anterior. Para a conservação, Ferreira (1998) atribui uma função de “desenrascar” e reparar um parque material a fim de assegurar a continuidade da produção, já a Manutenção é escolher os meios de prevenir, de corrigir ou renovar um parque material, seguindo um critério económico, a fim de otimizar o custo global de posse do equipamento.

### **3.3.2. Plano de Manutenção ou Programa de Manutenção**

Para uma Manutenção programada e organizada com antecedência, deverão ser fixadas as tarefas, os métodos e os recursos necessários para as intervenções de Manutenção a executar. O plano de Manutenção deverá conter o conjunto de acções baseado no tempo, descrevendo as actividades de Manutenção específica e a períodos definidos. O plano de Manutenção determina a qualidade do trabalho da Manutenção.

Pinto (1995) refere que a preparação do programa de Manutenção é uma actividade que requer experiência, pois não só as actividades de Manutenção devem ser indicadas como também a periodicidade do trabalho deve ser fixada tendo em conta as características e a disponibilidade do equipamento. Dentro do período de garantia dos equipamentos devem obviamente tomar-se precaução de forma a operar-se



com eles em conformidade com quaisquer instruções que façam parte do contrato com o fornecedor de modo a assegurar as garantias dadas por este.

### **3.3.3. Manutibilidade**

Segundo Ferreira (1998), manutibilidade é a probabilidade de recuperar um sistema nas condições de funcionamento especificadas, em prazos de tempo estabelecidos, quando as acções de Manutenção são efectuadas nas condições e com os meios previstos.

Assis (1997) afirma que a manutibilidade representa tudo o que poderá influenciar a aptidão de um sistema para receber Manutenção (facilidade de acesso, condições de segurança, precisão, economia). A manutibilidade dos sistemas está directamente relacionada com a rapidez e facilidade com que as intervenções de Manutenção podem ser realizadas (Pinto, 1999).

Ferreira (1998) apresenta ainda uma definição para manutibilidade como sendo a fiabilidade com que as reparações e o restante trabalho da Manutenção é efectuado e afecta directamente a disponibilidade dos equipamentos para efectuarem o serviço requerido. Pois, o tempo gasto na reparação de avarias e nas acções de Manutenção preventiva contribuem para a diminuição do tempo de exploração dos sistemas.

### **3.3.4. MTBF e MTTR**

A Manutenção pode servir-se de indicadores (índices), que sem exprimir toda a verdade sobre a realidade dos sistemas em estudo, são uma informação útil na avaliação do comportamento dos sistemas, nomeadamente, na ocorrência de falhas, nos tempos de reparação e na disponibilidade dos equipamentos.

Assim, poder-se-ão apresentar dois indicadores essenciais: o MTBF e o MTTR.

O tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between Failures*), segundo Cabral (1998), para um determinado sistema, exprime o tempo médio de bom funcionamento, ou seja, o tempo que decorre, em média, entre duas avarias consecutivas, ou numa outra aceção, o tempo médio entre acções de Manutenção correctiva.

Para um determinado período de tempo, o MTBF será:

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} \quad (3.1)$$

Onde:

$\sum TBF$  = Total de horas de bom funcionamento do sistema;

$N$  = Total de falhas ou avarias do sistema.

O MTBF é também um quantificador da Fiabilidade de sistemas, uma vez que o seu valor, uma vez calculado, expressa a aptidão do sistema para funcionar durante um determinado período de tempo em boas condições.

Um outro indicador algo parecido ao MTBF (Cabral, 1998), é o tempo médio para falhar (MTTF – *Mean Time To Failure*), que é um conceito idêntico, mas que apenas se aplica a sistemas não reparáveis.

O tempo médio de reparação (MTTR – *Mean Time To Repair*), segundo Cabral (1998), exprime o tempo médio necessário para reparar uma avaria, isto é, a média dos tempos de intervenção para Manutenção correctiva.

Para um determinado período de tempo, o MTTR será:

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} \quad (3.2)$$

Onde:

$\sum TR$  = Total de horas de reparação do sistema;

$N$  = Total de falhas ou avarias do sistema.

Este indicador (MTTR), é primordialmente uma medida da manutibilidade do equipamento, isto é, indica a aptidão do sistema para ser reparado para uma condição de bom funcionamento.

### 3.3.5. Disponibilidade

O termo disponibilidade suger uma noção de tempo, durante o qual determinado equipamento está disponível para a operação.

Aumentar a disponibilidade de um equipamento consiste em reduzir o número de paragens e em reduzir o tempo de reparação ou das intervenções preventivas da Manutenção. Segundo Ferreira (1998), este é o objectivo clássico dos serviços de Manutenção e implica o aumento da fiabilidade dos equipamentos (MTBF) e a diminuição dos tempos de intervenção (MTTR).

A disponibilidade pode ser calculada por:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.3)$$

Ou seja, a probabilidade de um sistema, segundo condições de Fiabilidade e manutibilidade definidas, realizar uma determinada função num instante de tempo ou num período definido.

A indisponibilidade ou “não disponibilidade” pode ser calculada por:

$$I = (1 - A) \quad (3.4)$$

A indisponibilidade caracteriza o tempo de inactividade dos sistemas (tempo de não-produção), e pode-se definir como a probabilidade de um sistema não realizar a sua função num determinado instante de tempo ou num período definido.

Uma vez que os indicadores, disponibilidade e indisponibilidade, são obtidos a partir de valores médios (MTBF e MTTR), então deve-se referir que os resultados de “A” e “I” são relativamente ao sistema, a disponibilidade média e a indisponibilidade média respectivamente.

### 3.3.6. Fiabilidade

Embora exista a necessidade de quantificar o número de falhas no tempo, perante a incerteza, relativamente ao momento em que as falhas ocorrem, apenas é possível o estudo probabilístico dos acontecimentos de falha.

A Fiabilidade, muitas vezes designada por Análise de Sobrevivência (*Survival Analysis*), constitui um método de análise estatística para estudar as ocorrências e os respectivos tempos dos acontecimentos (Dias, 2002).

Ferreira (1998) define Fiabilidade como sendo a característica dum dispositivo expressa pela probabilidade de exercer uma função requerida em condições de utilização e por um período de tempo determinado.

Sendo o conceito de Fiabilidade uma probabilidade significa que qualquer tentativa para a quantificar terá que utilizar métodos estatísticos (O'Connor, 2002).

Segundo O'Connor (2002), a Fiabilidade é quantificada de diversas formas, podendo ser calculada através do número médio de falhas num determinado período de tempo (taxa de falhas), ou tempo médio entre falhas (MTBF) para sistemas que podem ser reparados e novamente utilizados, ou como tempo até falhar para sistemas não reparáveis (MTTF). Contudo, O'Connor (2002) refere que para sistemas reparáveis, é normalmente assumido que as falhas ocorrem a uma taxa constante, pois trata-se de um caso particular, considerado, por acontecer muitas vezes e ser mais fácil de compreender. Nestes casos, o cálculo da taxa de falhas é o inverso do MTBF.

O objectivo fundamental dos estudos de fiabilidade deverá ser sempre fornecer a informação necessária à tomada de decisão (Dias, 2002). Antes de iniciar um estudo de fiabilidade, deve-se clarificar, objectivamente, o tipo de problema, os objectivos, as condições de fronteira e as limitações do estudo em função da informação disponível. Segundo Dias (2002), a forma como são obtidos os dados pode condicionar o tipo de aplicação estatística a utilizar.

### 3.3.7. Equipamento Redundante

Equipamento instalado em paralelo com outro similar, podendo funcionar alternativamente em qualquer momento. O grau de complemento do equipamento redundante pode ser diverso, podendo ir desde um equipamento completo até sistemas de menor dimensão que o componham. Este meio auxiliar é utilizado em situações em que a interrupção da produção tem custos elevados e portanto é necessário limita-la a valores muito reduzidos.

Em sistemas de laboração contínua é frequente a utilização de equipamentos redundantes como meio de garantir uma determinada Fiabilidade e disponibilidade global.

### 3.4. Sistemas Reparáveis/Não Reparáveis

Um sistema reparável (SR) pode ser definido como um conjunto de vários componentes associados para realizarem uma ou mais funções que, após cada avaria, são reparados para desempenhar a sua função. Um SR pode falhar mais do que uma vez. São considerados sistemas reparáveis, aqueles que cuja ocorrência de avaria não significa o seu fim de vida.

O'Connor (2002) refere que para os SR, a Fiabilidade, é a probabilidade de uma falha não ocorrer para um determinado período de interesse. A taxa de ocorrência de falhas (ROCOF – *Rate Of Occurrence Of Failure*) também pode ser calculada. Contudo a taxa de falhas expressa a probabilidade instantânea de falha por unidade de tempo.

Segundo O'Connor (2002), a Fiabilidade dos SR pode também ser caracterizada pelo MTBF (*Mean Time Between Failure*), mas apenas na condição de presença de uma taxa de falhas constante. Assim, a disponibilidade também poderá ser calculada, desde que se conheçam os tempos de reparação.

Um sistema não reparável pode ser definido como um conjunto de vários componentes associados para a realização de uma ou mais funções, mas que por

razões económicas ou tecnológicas, não é viável a sua reparação. São considerados sistemas não reparáveis, aqueles que cuja ocorrência de avaria significa o seu fim de vida. Logo, a falha só ocorre uma vez e o sistema terá de ser substituído.

Normalmente o entendimento de não reparável é mais associado aos componentes ou peças simples, cuja falha implica a sua inutilidade. Uma lâmpada é um dos exemplos mais claros de um componente não reparável. Para os componentes será importante o conhecimento da distribuição estatística que modela o seu tempo de vida, por forma a poder estimar a melhor periodicidade de substituição preventiva.

Os sistemas reparáveis são, frequentemente, sujeitos a acções de Manutenção que podem influenciar os intervalos de tempo entre falhas. Assim, ao iniciar qualquer estudo, é fundamental analisar a tendência e a independência dos dados disponíveis, considerando a ordem cronológica das falhas. O comportamento do sistema ao longo do tempo permite prever a sua tendência e adequar o Processo de Poisson que melhor modela o comportamento do mesmo.

### **3.5. Análise Estatística das Falhas**

Na análise estatística de sistemas reparáveis é fundamental considerar a ordem cronológica das falhas. Este facto pressupõe que se equacionem duas variáveis métricas importantes: o tempo de vida do sistema no momento da avaria e o tempo desde a última falha. Nem sempre estas duas variáveis são consideradas em separado, dando origem a algumas incorrecções no estudo da Fiabilidade de sistemas reparáveis.

No tratamento das variáveis métricas é importante considerar alguns aspectos que são comuns aos diferentes métodos. Podem-se resumir, essencialmente, os dois aspectos de partida para a análise e tratamento de dados de tempo:

- Recolha e tratamento de dados com a presença de valores censurados ou suspensos;

- Escolha da escala mais adequada para a variável métrica.

Os dados censurados aparecem de várias formas e ocorrem por múltiplas razões. A distinção mais vulgar é entre dados censurados à esquerda e dados censurados à direita. Segundo Leitão (1989), em aplicações práticas é vulgar considerar apenas os dados censurados à esquerda. Estas observações de tempo correspondem a situações onde o sistema reparável ou o componente não falha mas abandona o período de ensaio. Assim, tem-se apenas parte da informação, ou seja apenas se sabe que funcionou até um valor de tempo conhecido sem avariar, desconhecendo-se o valor de tempo da próxima avaria. Para estas situações Leitão (1989) considera que as últimas observações são mais relevantes que as iniciais, desprezando ou considerando como não censurados os valores de tempo censurados à esquerda.

Para O'Connor (2002), a preparação de bases de dados com registos rigorosos de todas as ocorrências que de alguma forma possam influenciar a Fiabilidade, são um elemento de trabalho imprescindível. Não devem também ser desprezados os acontecimentos exteriores e mudanças de condições de trabalho que têm acção directa sobre o fenómeno Fiabilidade.

Uma análise de frequência de falha permite quantificar e verificar as causas de falha que mais contribuem para uma determinada tendência da taxa de falhas de um sistema. Segundo O'Connor (2002), a grande dificuldade associada ao cálculo da Fiabilidade, é a quantificação das diferentes contribuições das diversas causas de falha que a influenciam, tornando-se um exercício de incerteza, sempre dependente dos dados disponíveis para o estudo estatístico.

Na análise dos dados de falha também poderá ser considerada a elaboração de diagramas de Pareto. Segundo Ferreira (1998), os diagramas de Pareto ou diagramas de barras permitem melhor visualizar qual ou quais as prioridades da análise dos componentes que sofrem avarias. Para a construção do diagrama de Pareto, geralmente, os componentes são agrupados por famílias que serão apresentadas no eixo das abcissas. No eixo das ordenadas pode ser representado o número de avarias registadas por família. Poder-se-á também traçar a curva ABC de

Pareto, que dá uma ideia global das prioridades a adoptar nas acções de melhoria dos equipamentos.

O'Connor (2002) refere que na análise de Fiabilidade, o diagrama de Pareto pode ser uma boa ferramenta para distinguir as causas de falha mais significativas das menos significativas no processo de falha.

### 3.6. Taxa de Falhas

A taxa de falhas é a principal medida da Fiabilidade e é definida como a derivada em ordem ao tempo do número esperado de falhas. Segundo Dias (2002), a taxa de falhas tem a ver com o processo estocástico que modela o número de falhas ao longo do tempo.

Um sistema reparável poderá estar sujeito a várias falhas dependentes ou não de factores internos ou externos ao próprio sistema que podem influenciar a sua taxa de ocorrência de falhas (ROCOF – *Rate Of Occurrence Of Failures*).

O'Connor (2002) refere que as falhas que ocorrem, aleatoriamente, em sistemas reparáveis e que não podem ser representados por uma função de distribuição contínua, são um exemplo de uma série de acontecimentos discretos. Segundo O'Connor (2002), estas situações são chamadas de Processos Estocástico Pontuais (*Stochastic Point Process*) e podem ser analisadas usando métodos estatísticos de séries de acontecimentos.

Quando se pretendem analisar dados de um Processo Estocástico Pontual, é importante determinar se o processo tem tendência, isto é, saber se a taxa de falhas está a crescer, decrescer ou está constante (O'Connor, 2002).

O'Connor (2002) aconselha a utilização do teste de Laplace para analisar a possibilidade da presença de possíveis Processos de Poisson.

Um Processo de Poisson, na vertente *soft* da Gestão da Manutenção, consiste numa sequência de ocorrências de falha ou avaria de um sistema reparável, durante o seu



período de funcionamento. Na Figura 3.2 está representada, a título de exemplo, uma sequência de ocorrências de falha, para um determinado período de funcionamento, onde  $\tau$  representa o tempo de vida do sistema no momento da falha ou a idade do sistema em cada falha.

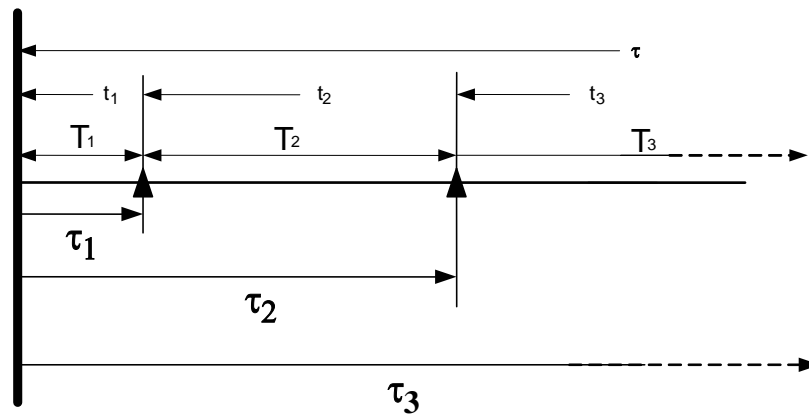


Figura 3.2 – Exemplo de um Processo Estocástico Pontual

Fonte: Dias (2002)

Considerando que o sistema reparável é constituído por um ou mais componentes, a sequência de falhas indicada pode ser devida à falha de um mesmo componente ou de componentes distintos. Para a primeira falha ter-se-ia, por exemplo, uma função de probabilidade de falha  $F_1(t) = P(T_1 \leq t_1)$  dada por  $P(T_1 \leq t_1) = \int_0^{t_1} f_1(u) du$  e assim sucessivamente, para as restantes falhas. Então, estamos perante um conjunto de variáveis aleatórias distintas: Idade do sistema no momento da falha ( $\tau$ ) e tempo desde a última falha ( $T$ ) que depende da função de probabilidade que modela o tempo de vida do componente que falha na posição  $i$ .

A dificuldade surge, frequentemente, quando os tempos desde a última falha podem ser modelados por uma distribuição estatística. Se esta distribuição estatística é a distribuição exponencial negativa, caracterizada por uma função de risco constante então, é vulgar considerar que se trata de um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) esquecendo a sequência cronológica das falhas.

A taxa de falhas pode ser decrescente, crescente ou constante. A cada um destes casos, corresponde uma situação particular no que respeita à Fiabilidade. Para O'Connor (2002), a uma taxa de falhas decrescente corresponde uma “Fiabilidade crescente”, taxa de falhas crescente, corresponde a Fiabilidade decrescente e a uma taxa de falhas constante significa falhas independentes e identicamente distribuídas.

Segundo Dias (2002), quando o sistema é acompanhado ao longo de um grande período de observação, é recomendado o cálculo do tempo cumulativo médio entre falhas (*CMTBF*). Este valor, que corresponde ao inverso da taxa cumulativa de falhas, permite fazer uma análise da evolução do sistema ao longo do período de observação. Assim, dividindo o período de observação em vários subintervalos é possível estimar a taxa de falhas, para cada intervalo. O valor para o subintervalo  $i$  pode ser estimado por:

$$\hat{\rho}_i(\tau) = \frac{N_i(\tau) - N_{i-1}(\tau)}{\Delta \tau} \quad (3.5)$$

Onde  $N_i(\tau)$  é o número total de falhas observadas desde  $\tau = 0$  até ao fim do intervalo  $i$  e  $\Delta \tau$  é a duração de cada subintervalo. Nestas circunstâncias o estimador natural do tempo médio entre falhas acumulado (*CMTBF*) pode ser obtido por:

$$\hat{CMTBF} = \frac{\Delta \tau}{N_i(\tau) - N_{i-1}(\tau)} \quad (3.6)$$

Este estimador representa o tempo médio entre falhas para cada um dos intervalos considerados. Pode ser de grande utilidade em virtude da sua análise ao longo do tempo permitir uma avaliação rápida do comportamento do sistema.

### 3.7. Teste de Laplace

O teste de Laplace é utilizado em Fiabilidade para proceder a um estudo prévio da taxa de falhas, no sentido de conhecer a sua evolução e permitir, então, identificar o comportamento do sistema num dado intervalo de tempo.

O teste de Laplace, baseado numa estatística amostral, permite verificar se a taxa de falhas é constante ou se, pelo contrário, apresenta alguma tendência. Dias et al. (1999) utilizam o teste de Laplace para testar a presença de um possível Processo de Poisson. Para um teste limitado por tempo a expressão a aplicar será:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] \quad (3.7)$$

onde  $T_0$  representa o tempo de duração do teste,  $\tau_i$  corresponde à ordem cronológica da falha, ou seja, a idade do sistema no momento da falha e  $n_f$  o número total de falhas para o período de teste considerado.

No pressuposto de um Processo de Poisson o valor da estatística amostral segue uma distribuição Normal reduzida com média zero e variância unitária. A hipótese nula,  $H_0$  ou seja, a hipótese de se estar a tender para um Processo de Poisson Homogéneo (PPH), será rejeitada se  $Z_0$  for superior ao valor crítico, para um determinado nível de significância  $\alpha$ . Isto é, se  $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ , então rejeita-se  $H_0$  e está-se perante um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH).

Nas circunstâncias em que os valores de  $Z_0$  são positivos e fora do intervalo de confiança, denuncia-se a presença de um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH) com tendência para taxa de falhas crescente e para valores negativos, a tendência para taxa de falhas decrescente. Para valores de  $Z_0$  dentro do intervalo de confiança está-se perante um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) com uma taxa de falhas constante. Porém, o sinal do valor de  $Z_0$  pode preannunciar uma ligeira tendência (crescente ou decrescente consoante o sinal) da taxa de falhas.

Uma análise gráfica representando os tempos de vida do sistema no momento da falha, poderá consistir uma óptima ferramenta para uma percepção visual do comportamento do sistema reparável e verificar a possível tendência da taxa de falhas. Perante esta análise poder-se-á verificar se existe aumento dos intervalos de tempo entre falhas prenunciando uma taxa de falhas decrescente ou se pelo contrário apresenta uma tendência crescente. Se for possível ajustar uma recta ao conjunto de pontos que representam as falhas o sistema segue um Processo de Poisson Homogéneo e prenuncia uma taxa de falhas constante. No entanto, a representação gráfica, apesar de permitir uma avaliação visual do comportamento do sistema relativamente à taxa de falhas, não deve dispensar a utilização do teste de Laplace.

Esta metodologia estatística (teste de Laplace), pode ser encontrada em O'Connor (2002), onde o autor, para além de desenvolver o tema, apresenta alguns exemplos práticos.

Segundo O'Connor (2002), uma condição essencial de qualquer Processo Homogéneo de Poisson, é a probabilidade dos acontecimentos a ocorrer em qualquer período, ser independente do que ocorreu em períodos precedentes. Um PPH descreve a sequência de independente e identicamente exponencialmente distribuído (IID) das variáveis aleatórias. Um PPNH descreve uma sequência de variáveis aleatórias que não é independente, nem identicamente distribuída.

Numa aplicação a redes de distribuição de energia eléctrica, Dias *et al.* (1997b) analisam, com algum detalhe, uma aplicação do teste de Laplace para identificar se os dados, pertencentes a uma amostra, apresentam um comportamento homogéneo.

### **3.8. Processos de Poisson**

Uma vez que a área da análise estatística, referente aos processos estocásticos, é muito vasta, neste número são apresentadas apenas o conjunto de técnicas desenvolvidas para os modelos de processos estatísticos pontuais que são

potencialmente aplicáveis aos sistemas reparáveis, nomeadamente os mais aplicados na indústria e que mais relevo apresentam para o estudo pretendido.

Como os sistemas reparáveis são frequentemente sujeitos a acções de Manutenção preventiva e correctiva que podem influenciar os intervalos de tempo entre avarias, Dias et al. (1999), considera que ao iniciar-se qualquer estudo é fundamental analisar a tendência dos dados disponíveis.

A análise de qualquer sistema reparável deve ser efectuada com uma amostra de dados significativa e será necessário conhecer a ordem cronológica das ocorrências. Para sistemas reparáveis o número de falhas segue, tipicamente, um Processo de Poisson (Dias, 2002).

São vários os autores a utilizar o teste de Laplace para identificar se os dados pertencentes a amostras que apresentam comportamentos homogéneos. Em Dias et al. (1999) é demonstrada a utilização de processos estocásticos pontuais na análise do comportamento de uma rede de distribuição de energia eléctrica. Para tal, Dias et al. (1999) modelaram uma amostra de dados de tempos de falha referentes ao sistema reparável, onde utilizaram o teste de Laplace para caracterizar a tendência da taxa de falhas do sistema para o período de estudo considerado.

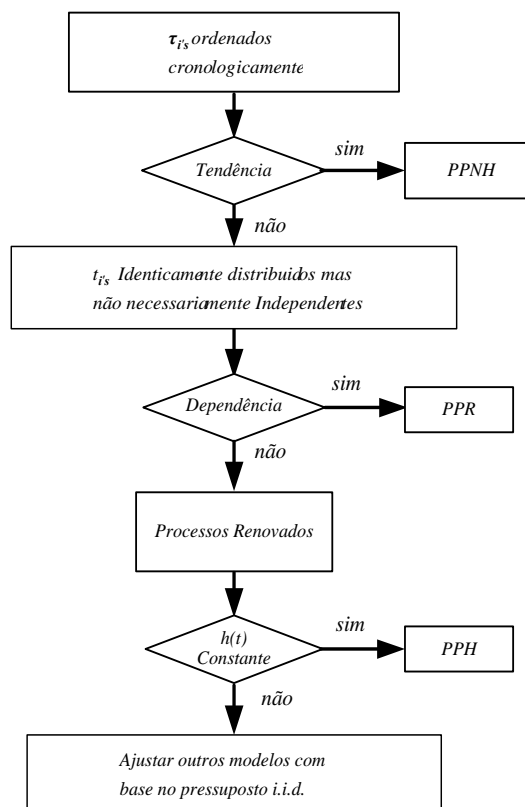
Stillman (1999) utiliza também o teste de Laplace para confirmar a presença de um Processo de Poisson Homogéneo num estudo comparativo de dois sistemas reparáveis. Stillman (1999) recorre ainda à análise gráfica entre o número cumulativo de falhas, versus o tempo cumulativo de funcionamento dos sistemas, considerando que deverá ser o primeiro passo num estudo em que se pretende analisar o comportamento global de sistemas reparáveis.

Ansell e Phillips (1989) usam também o teste de Laplace no seu estudo e referem que este teste pode ser usado para testar a tendência da taxa de falhas em sistemas reparáveis.

Em Bohoris (1996a) e Bohoris (1996b) também está bem evidente que o uso do teste de Laplace é um teste estatístico apropriado para verificar a tendência da taxa de falhas em sistema reparáveis.

Os modelos de Processo Estocásticos Pontuais possíveis de aplicar aos sistemas reparáveis devem considerar o tipo de Processo de Poisson associado aos dados. Em função do comportamento aleatório ou não dos dados podem-se considerar vários Processos de Poisson.

Considerando a ordem cronológica das falhas e utilizando testes estatísticos, nomeadamente, o teste de Laplace, é possível identificar os vários tipos de processos estocásticos pontuais. A figura 3.3 apresenta sob a forma de fluxograma o processo de identificação do modelo mais apropriado para cada caso.



**Figura 3.3 – Análise estatística da ordem cronológica das falhas**

Fonte: Dias (2002)

Dias (2002) refere que é vulgar considerar que um sistema, com um grande número de componentes, quando não apresenta tendência constitui um PPH. A sua taxa de falhas, em regime estacionário, tende para um valor constante.

### **3.8.1. Processos de Poisson não Homogêneos (PPNH)**

Ansell e Phillips (1989) afirmam que o resultado do teste de Laplace indica se se está perante um modo estacionário ou não e que em caso afirmativo, o segundo passo será testar a independência dos dados de falha para decidir se o Processo de Poisson Homogéneo pode ser mesmo usado.

Um Processo de Poisson Não Homogéneo caracteriza-se por uma taxa de falhas dependente do tempo significando que, ao longo do tempo, os intervalos de tempo entre falhas tendem a aumentar ou a diminuir.

Assim poder-se-á estar perante um sistema reparável com taxa de falhas decrescente (ROCOF decrescente) ou com taxa de falhas crescente (ROCOF crescente).

#### **3.8.1.1. Sistemas com Taxa de Falhas Decrescente**

Nos sistemas com um ROCOF decrescente existe uma tendência para o aumento dos intervalos de tempo entre falhas. Um sistema com uma taxa de falhas decrescente quer dizer que a sua Fiabilidade melhora ao longo do tempo. Logo se for analisado do ponto de vista da Manutenção, poder-se-á concluir que as intervenções efectuadas após cada avaria tendem a melhorar a Fiabilidade do sistema.

Segundo Dias (2002), os sistemas com tendência para uma taxa de falhas decrescente podem ser analisados utilizando o modelo de Crow, também designado por "Modelo de Fiabilidade Crescente", que constitui uma reformulação do modelo de Duane. Este modelo permite estimar a taxa de falhas e consequentemente estimar o valor do MTBF para as falhas mais recentes. Este modelo permite também definir intervalos de confiança para o MTBF estimado.

O número de falhas por unidade de tempo de um sistema reparável pode ser definido por:

$$\rho(\tau) = \frac{d\{E[N(\tau)]\}}{d\tau} \quad (3.8)$$

Onde o número esperado de falhas representado por  $E[N(t)]$ , será:

$$E[N(\tau)] = \hat{\lambda} \tau^\beta \quad (3.9)$$

Assim, segundo o modelo de Crow a estimativa da taxa de falhas será dada por:

$$\rho = \hat{\lambda} \cdot \beta \cdot \tau^{(\beta-1)} \quad (3.10)$$

Onde  $\tau$  representa o tempo de duração do teste. A estimativa das constantes do modelo pode ser facilmente obtidas pela função de máxima verosimilhança. Para dados censurados por tempo as estimativas de  $\beta$  e  $\hat{\lambda}$  são respectivamente,

$$\beta = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f} \ln \frac{T}{\tau_i}} \quad (3.11)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T^\beta} \quad (3.12)$$

Onde  $T$  representa o tempo total de duração do teste e, como anteriormente,  $\tau_i$  o tempo de vida no momento da falha do sistema e  $n_f$  é o número total de falhas para o período de teste considerado.

O inverso da taxa de falhas, para as falhas mais recentes será dado por:

$$\theta = \frac{1}{\hat{\lambda} \cdot \beta \cdot \tau^{(\beta-1)}} = \frac{1}{\rho} \quad (3.13)$$

O número de falhas por unidade de tempo de um sistema reparável pode ser definido por:

Os intervalos de confiança para o MTBF estimado serão:

$$\text{Limite inferior:} \quad \theta_l = \theta \cdot \pi_1 \quad (3.14)$$

$$\text{Limite superior:} \quad \theta_s = \theta \cdot \pi_2 \quad (3.15)$$



Os valores de  $\pi_1$  e  $\pi_2$ , são obtidos directamente das respectivas tabelas (anexo IV), para o intervalo de confiança desejado.

Kobbacy e Jeon (2002) recorrem ao modelo de Crow, após o teste de tendência da taxa de falhas com o teste de Laplace, com o objectivo de optimizar eficientemente a programação da Manutenção preventiva de sistemas reparáveis.

Doyen e Gaudoin (2002) também se referem ao modelo de Crow, como o mais usual no ajuste das acções de Manutenção preventiva e de reparações mínimas.

### **3.8.1.2. Sistemas com Taxa de Falhas Crescente**

Nos sistemas com um ROCOF crescente os intervalos de tempo entre falhas tendem a diminuir ao longo do tempo prenunciando a degradação ou uma eventual tendência de envelhecimento do sistema. Um sistema com uma taxa de falhas crescente quer dizer que a sua Fiabilidade piora ao longo do tempo.

Segundo O'Connor (2002), quando estamos perante uma taxa de falhas significativamente crescente, não interessa utilizar estimadores, mas determinar as causas das avarias ou verificar se o equipamento está no seu final de vida.

Perante um cenário em que um sistema reparável apresenta uma taxa de falhas crescente, existe evidência de falhas a contribuírem negativamente para a sua Fiabilidade. Será necessário uma análise detalhada a todos os pressupostos que poderão estar a influenciar o comportamento do sistema. As causas possíveis podem ser uma Manutenção deficiente, uma tendência natural do envelhecimento do equipamentos ou determinados componentes, uma alteração na operacionalidade do processo produtivo que esteja a interferir no normal funcionamento do sistema, entre outras.

Dias (2002) apresenta 3 situações possíveis para a ocorrência de uma taxa de falhas crescente num sistema reparável que, dependendo dos dados disponíveis, não deverão deixar de ser analisadas:

- Existe uma causa assinalável, por exemplo a influência de um operador, que pode provocar a tendência verificada nos dados; nestes casos, após correcção da causa especial, o sistema deverá apresentar um comportamento aleatório;
- Componentes com função de risco crescente estão a influenciar o comportamento do sistema; nestes casos, uma intervenção de Manutenção, nos referidos componentes, pode ser a solução mais correcta;
- O sistema atinge o termo da sua vida útil não se justificando modelar o seu comportamento.

Perante a ocorrência de uma taxa de falhas crescente, não faz sentido o cálculo ou estimativa do MTBF para esse período de estudo. Se for calculado, o MTBF traduzirá o valor médio de bom funcionamento de todo o período de estudo considerado, o que induzirá em erro como indicador da Fiabilidade do sistema. Para as últimas ocorrências, um sistema com taxa de falha crescente terá um tempo de funcionamento entre falhas inferior ao valor médio para o período inteiro. Assim, será aconselhável distinguir esses valores, relativamente a outros que na realidade estejam mais correctos.

Para períodos com taxa de falhas crescente distinguir-se-á esse valor com o tempo cumulativo médio entre falhas (*CMTBF*).

Para um determinado período de tempo, o CMTBF será:

$$CMTBF = \frac{\sum TBF}{N} \quad (3.16)$$

Este estimador representa o tempo médio entre falhas para um dado intervalo considerado. Poderá ter interesse, numa perspectiva da Gestão da Manutenção, relativamente a análises de custos.

### 3.8.2. Processos de Poisson Ramificados (PPR)

Neste processo, uma série de acontecimentos primários é gerada por um Processo de Poisson Homogêneo e cada acontecimento primário tem possibilidade de gerar acontecimentos dependentes (Dias, 2002). Esta sequência de acontecimentos subsidiários pode estar relacionada com um desempenho deficiente da Manutenção que, após a ocorrência de uma falha, pode provocar uma série de falhas dependentes da intervenção anterior. A sua aplicação em termos práticos é bastante difícil, em virtude da dificuldade emergente da separação dos acontecimentos subsidiários dos primários (Dias, 2002).

### 3.8.3. Processos de Poisson Homogêneos (PPH)

Um Processo de Poisson Homogêneo caracteriza-se por uma taxa de falhas constante no tempo (ROCOF constante). Numa possível representação gráfica do número de falhas em função do tempo de vida do sistema no momento da falha, os dados apresentarão uma sequência aleatória.

Dias et al. (1999) referem que em circunstâncias particulares associadas a aspectos físicos dos sistemas em análise, pode existir a necessidade de testar a dependência dos dados utilizando os princípios da autocorrelação. Em situações práticas é suficiente considerar o teste de Laplace para assumir o pressuposto IID (independentes e identicamente distribuídos). Dias et al. (1999) afirmam ainda que os dados em que os intervalos de tempo entre falhas são IID, pertencem aos denominados Processos Renovados (RP – *Renewal Process*). Neste caso, se o número de dados for suficiente pode-se ajustar uma distribuição estatística e a partir dela calcular a Fiabilidade do sistema.

Segundo Dias (2002), um Processo de Renovação (*Renewal Process*) pode ser definido como uma sequência interminável de variáveis aleatórias positivas independentes e identicamente distribuídas (IID), o qual constitui a generalização do Processo de Poisson Homogêneo. Então, um PPH será definido como uma

sequência interminável de variáveis aleatórias positivas exponencialmente distribuídas.

Dias (2002) refere que nestas condições, a expressão 3.17 permite calcular a Fiabilidade do sistema reparável, para um determinado intervalo de tempo  $\Delta\tau$ , onde  $\lambda$  representa a taxa de falhas do sistema:

$$R(\Delta\tau) = e^{-\lambda\Delta\tau} \quad (3.17)$$

Esta expressão representa a generalização do Processo de Poisson para um sistema com um número médio de falhas  $m = \lambda \Delta\tau$ , para um intervalo de tempo  $\Delta\tau$ , e corresponde, para a distribuição de Poisson, à probabilidade de zero avarias, que pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$P(X = k) = \frac{e^{-m} m^k}{k!} \quad (3.18)$$

A expressão 3.18 representa a função densidade de probabilidade da ocorrência de  $k$  avarias, o que para  $k = 0$  daria  $P(X = 0) = e^{-m}$ .

### 3.8.3.1. Sistemas com Taxa de Falhas Constante

Para uma taxa de falhas constante de um sistema reparável, na representação gráfica do número de falhas em função do tempo de vida no momento da falha, apesar dos dados apresentarem uma sequência aleatória, será possível ajustar uma recta ao percurso dos pontos. Assim, o sistema não apresenta tendência e segue um Processo de Poisson Homogéneo (PPH). Esta representação gráfica não deve dispensar a utilização do teste de Laplace, como modo de comprovar a análise prévia.

Para estes casos, O'Connor (2002) refere que se pode analisar a Fiabilidade com o cálculo do MTBF (*Mean Time Between Failure*), uma vez que as falhas são independentes e identicamente distribuídas.

Como a distribuição estatística é a distribuição exponencial negativa, caracterizada por uma função de risco constante então, esquecendo a sequência cronológica das falhas, o inverso do MTBF dará o valor da taxa de falhas:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (3.19)$$

E o número médio de falhas será  $N(\tau) = \lambda\tau$ , onde  $\tau$  representa o tempo do período de tempo de funcionamento do sistema.

No entanto, o facto de o sistema se comportar como um PPH, e de os tempos desde a última falha seguirem uma distribuição Exponencial negativa, não significa que os componentes que o compõem apresentem uma função de risco constante (Dias et al., 1999).

# CAPÍTULO 3

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Introdução

Manutenção é uma actividade realizada sobre um sistema reparável, de tal forma que este desempenhe as suas missões correctamente ou, aumente a sua disponibilidade, Fiabilidade e segurança.

Este capítulo é exclusivamente dedicado à revisão bibliográfica, procurando referenciar de forma abrangente conteúdos e metodologias necessárias ao desenvolvimento deste estudo. Na sua maioria, os aspectos focados foram utilizados nesta dissertação e houve sempre a preocupação em recorrer a publicações científicas, fontes fidedignas e actuais para a recolha de elementos.

Pretende-se enquadrar a Manutenção no contexto actual, definir os principais conceitos e mais pormenorizadamente, apresentar modelos estatísticos mais utilizados na análise de falhas e da disponibilidade dos equipamentos.

Com este capítulo pretende-se também, apresentar um conjunto de metodologias tipicamente mais utilizadas na análise de sistemas reparáveis e actualmente considerados mais exactos.

Assim, atendendo ao âmbito do presente estudo, a revisão bibliográfica centrou-se essencialmente na pesquisa de metodologias a utilizar na análise e modelação das falhas do sistema de cozedura.

### 3.2. Manutenção no Contexto Actual

Desde o início do século XX, com a evolução das técnicas de produção, evidenciada pela automatização dos sistemas, a Manutenção tem cada vez mais um papel fundamental no seio dos meios produtivos.

A Manutenção tem vindo a ser encarada, nos últimos anos, como uma das funções que, sendo optimizada, poderá contribuir cada vez mais para os resultados da actividade das empresas (Canuto, 2002). É sem dúvida impreterível pensar que a Manutenção é nos dias de hoje uma actividade técnica de enorme relevo e importância na vida económica das indústrias e empresas.

Nas últimas décadas tem-se verificado uma enorme pressão em todas as organizações industriais no sentido de serem mais competitivas no mercado mundial (Julião e Greenough, 2003). Neste contexto, a Manutenção desempenha um papel importantíssimo visto ser determinante para garantir a disponibilidade dos equipamentos e influenciar de forma significativa o nível de qualidade dos bens produzidos, tal como os custos de produção.

A qualidade representa actualmente uma das principais preocupações das empresas. A contribuição da Manutenção no desempenho e na rentabilidade dos sistemas de produção é a de assegurar que a fábrica execute de acordo com as condições especificadas ou com as que a organização espera alcançar, equilibrando os seus recursos e *outputs* (Cholasuke et al., 2004).

Segundo Julião e Greenough (2003), o principal objectivo da função Manutenção é reduzir os tempos de paragem, pois têm um impacto significativo na produtividade das organizações. Para reduzir os tempos de paragem, a Manutenção tem de ser capaz de prever falhas, de proporcionar reparações eficazes e eficientes, de modo a reduzir o tempo de intervenção.

No contexto da Gestão da Manutenção Industrial, têm sido desenvolvidas novas técnicas e filosofias com o objectivo de optimizar a utilização dos recursos, aumentando o potencial efectivo dos meios de produção. Segundo Dias et al. (1999), a Gestão da Manutenção deve ser entendida não como uma obrigação dos

serviços de Manutenção de uma empresa mas, como uma actividade essencial para o aumento da qualidade e produtividade. Neste âmbito surge uma nova filosofia denominada por Manutenção Produtiva Total (TPM - *Total Productive Maintenance*).

O TPM é uma filosofia de Manutenção cujo objectivo é o contínuo melhoramento, estando subjacente a colaboração entre equipas dentro da empresa. Tsang e Chan (2000) referem que a implementação do TPM implica uma mudança radical na cultura organizacional das empresas, nomeadamente, uma redefinição de regras nas operações da produção e da Manutenção. Neste contexto, Cigolini e Turco (1997) referem a necessidade de obter a motivação e a participação dos colaboradores fabris em todas as funções da empresa, eliminando o dualismo entre produção e Manutenção. Smith e Hawkins (2004) acrescentam que o TPM é baseado na Manutenção proactiva e envolve todos os níveis e funções da organização, desde os executivos de topo até aos colaboradores fabris.

A metodologia TPM assenta sobretudo no estabelecimento de um sistema global de Manutenção Produtiva com objectivos que maximizem a eficácia da instalação, devendo para tal obter o envolvimento de todos os elementos da empresa e a todos os níveis. Segundo Tsang e Chan (2000), o TPM é um método inovador para a Manutenção, o qual assegura um potencial e eficiente aumento de vantagens para a produção. A aplicação do TPM permite à empresa melhorar e aumentar a sua produtividade tal como a sua qualidade de forma notável.

Tsang e Chan (2000) afirmam que a metodologia TPM tem provado ser eficaz para a optimização da eficiência do equipamento e na eliminação de falhas. Actualmente, as vantagens da implementação do TPM foram reconhecidas e este envolve os processos industriais de praticamente todo o Mundo (Cigolini e Turco, 1997).

Em Dias et al. (1997a) abordam-se alguns modelos estatísticos possíveis de utilizar na área do TPM. Segundo os autores que com o conhecimento da evolução do número de falhas no tempo e a sua ordem cronológica é possível avaliar o comportamento de sistemas reparáveis, e consequentemente, aplicar modelos que permitam uma tomada de decisão em termos de TPM.



O TPM como filosofia de gestão encontra-se aplicado em algumas empresas. No entanto, nem sempre, a sua utilização está baseada em modelos estatísticos de apoio à Gestão da Manutenção. Em muitas situações, o simples cálculo do tempo médio entre falhas, não considera a ordem cronológica das mesmas, pelo que não é possível avaliar o comportamento do sistema na sua globalidade nem prever a melhor política de substituição preventiva de componentes.

### **3.3. Definição dos Principais Conceitos**

Com base em publicações de diversos autores portugueses e estrangeiros, pretende-se neste sector expor diversos conceitos que se consideram de importância relevante para o tema a tratar. Esta abordagem, apesar de não ser exaustiva, procura enquadrar os conceitos mais vulgarmente utilizados na área da Gestão da Manutenção.

#### **3.3.1. Manutenção**

A Manutenção constitui um conjunto de acções empreendidas com o objectivo de repor o sistema avariado nas condições operacionais de novo (Assis, 1997).

Ferreira (1998) apresenta a definição de Manutenção, segundo a AFNOR, como sendo um conjunto de acções que permitem manter ou restabelecer um bem num estado ou com possibilidade de assegurar um serviço determinado.

A Manutenção é uma combinação das acções e técnica aplicadas aos bens (sistemas, equipamentos e/ou instalações), para a optimização dos seus ciclos de vida, isto é, todas as acções necessárias para manter, ou reparar um sistema de modo a restaurar a sua condição inicial de bom funcionamento.

Cabral (1998) define a Manutenção como o conjunto das acções destinadas a assegurar o bom funcionamento das máquinas e das instalações, garantindo que elas são intervencionadas nas oportunidades e com alcances certos, por forma a

evitar que avariem ou baixem de rendimento e, no caso de tal acontecer, que sejam repostas em boas condições de operacionalidade com a maior brevidade, tudo a um custo global optimizado.

Dias (2002) apresenta a Manutenção como uma actividade realizada sobre um sistema reparável, de tal forma que este desempenhe as suas missões correctamente ou, aumente a sua disponibilidade, Fiabilidade e segurança.

Os objectivos da Manutenção Industrial têm de ser ligados aos objectivos globais da empresa, uma vez que a Manutenção afecta a rentabilidade do processo produtivo, influenciando, tanto o volume e a qualidade da produção, como o seu custo. Segundo Cabral (1998), o conjunto das acções destinadas a encontrar e a situar o nível da Manutenção num ponto de equilíbrio entre o benefício e o custo, que maximize o contributo positivo da Manutenção para a rentabilidade geral da empresa, constitui a Gestão da Manutenção.

Pinto (1995) sintetiza o conceito de Gestão da Manutenção como o conjunto das técnicas que podem contribuir para uma melhoria significativa da produtividade e eficiência do Departamento de Manutenção.

Considerando as perspectivas dos vários autores, poder-se-á referir que a Manutenção é, no presente, uma actividade de elevada complexidade e para a qual é necessária uma elevada especialização quer na sua componente *Soft*, quer na sua componente *Hard*. Assim, pode-se resumir a função Manutenção como um conjunto de metodologias estatísticas (componente *Soft*) que nos permitem programar e realizar as acções de técnicas Manutenção (componente *Hard*) com a periodicidade mais adequada à rentabilização do sistema reparável.

#### **3.3.1.1. Função da Manutenção**

O modelo de Manutenção a adoptar deverá ser em função das características da instalação industrial, devendo ser coerente com os equipamentos existentes e com a sua exploração.

Qualquer equipamento, sistema ou instalação, seja ele mecânico, eléctrico/electrónico, hidráulico ou pneumático, está sempre sujeito a um processo progressivo de degradação, em consequência da utilização ou até por causas fortuitas. Isto requer que sejam efectuadas reparações, inspecções, rotinas preventivas, substituições de órgãos ou peças, mudanças de óleo, limpezas, correcção de defeitos, fabricação de componentes, pinturas, etc., para que se possa repor os níveis de operacionalidade. Este conjunto de acções forma o leque de actividades, ou a missão, da Função Manutenção (Pinto, 1995).

Embora as actividades do serviço de Manutenção variem com a dimensão e o tipo de empresa, bem como a política adoptada, segundo Pinto (1999), é possível agrupar essas actividades em duas áreas funcionais:

- Funções primárias, que estão relacionadas com o trabalho diário efectuado pelo serviço de Manutenção. As funções primárias incluem a Manutenção dos equipamentos e instalações, incluindo as tarefas de planeamento, programação e controlo dos trabalhos de Manutenção, quer seja na elaboração de planos ou na emissão de ordens de trabalho, tendo ainda a função técnica do estudo dos processos de avarias no equipamento, a elaboração de registos históricos, a determinação de custos, a gestão e formação do pessoal afecto ao serviço, entre outros. As funções primárias incluem ainda a inspecção, lubrificação e limpeza dos equipamentos, a instalação de novos equipamentos e a participação na sua concepção e construção;
- Funções secundárias, que são adjudicadas ao serviço por razões de experiência precedente ou outras. Alguns exemplos de funções secundárias são os estudos e projectos, a protecção e segurança industrial, a higiene e segurança no trabalho, controlo das fontes de poluição, entre outros.

Os objectivos da função Manutenção são os de melhorar a Fiabilidade dos equipamentos, diminuindo o número de avarias verificados, melhorar a manutibilidade dos equipamentos, diminuindo os tempos de reparação e consequentemente, aumentar a disponibilidade.

### 3.3.1.2. Classificação da Manutenção

Existem essencialmente dois tipos de intervenções de Manutenção: Manutenção correctiva e Manutenção preventiva (Pinto, 1999). Na realidade numa percentagem significativa das indústrias continuam a prevalecer as intervenções com carácter correctivo, quer porque nem todas as avarias são previsíveis ou susceptíveis de serem evitadas, quer por falta de implementação de metodologias de análise de histórico de falhas que permitam uma Manutenção de carácter preventivo.

A Manutenção tem registado uma grande evolução do ponto de vista orgânico. Foram criadas filosofias e metodologias de trabalho que, com a sua evolução, possibilitaram classificar os diferentes tipos de intervenção na actividade da Manutenção. A figura 3.1 representa a classificação dos diferentes tipos de Manutenção na actualidade mais evidenciados.

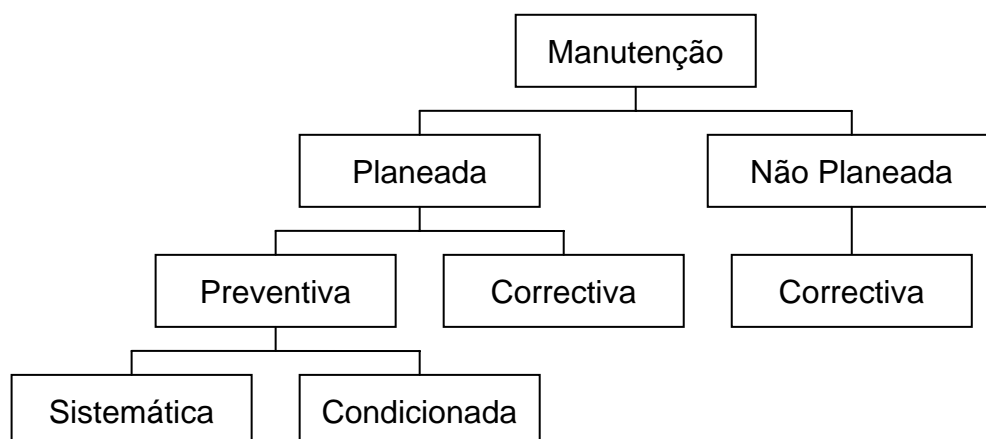


Figura 3.1 – Classificação dos tipos de Manutenção

Quanto à forma de actuar perante uma determinada avaria ou anomalia, as intervenções da Manutenção podem ser não planeadas, se as avarias ocorrem de forma imprevista, ou planeadas quando o equipamento permite o planeamento das acções de Manutenção para o momento mais oportuno.

A Manutenção correctiva, tal como o seu nome indica, tem por objectivo a correcção de avarias ou deficiências do sistema. Quando ocorre, na maioria dos casos, não é

programada e na maioria das situações é a forma mais tradicional de fazer Manutenção (Dias, 2002).

A Manutenção correctiva é o conjunto das actividades realizadas após a ocorrência de uma avaria ou degradação do sistema, para desempenhar a função requerida. A Manutenção correctiva compreende a localização da avaria e o seu diagnóstico, a reposição do funcionamento com ou sem modificação e o controlo de bom funcionamento. Dias (2002) refere que para acções de Manutenção correctiva em equipamentos de laboração contínua, é exigido um esforço adicional da equipa de Manutenção pois, normalmente, obriga a meios de intervenção nem sempre disponíveis no momento da falha. As acções de Manutenção correctiva deverão ser reduzidas ao mínimo através da racional gestão e planificação das tarefas de Manutenção.

A Manutenção preventiva é realizada em intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos. Ferreira (1998) considera que a Manutenção preventiva pressupõe a intervenção do serviço de Manutenção num momento devidamente preparado e programado antes da data provável do aparecimento de uma avaria. Um programa de Manutenção preventiva deverá ser definido com o objectivo de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do sistema ou do serviço por si prestado. Pinto (1995) refere que o conceito de Manutenção preventiva fundamenta-se no estudo da Fiabilidade dos equipamentos. Dias (2002) refere que a Manutenção preventiva tem sido reconhecida como uma actividade extremamente importante para os sistemas em geral pois, para além de reduzir os custos de Manutenção, permite aumentar a Fiabilidade do sistema.

Existem essencialmente dois tipos de Manutenção preventiva, compreendidos também como tipos de Manutenção:

- Manutenção sistemática, que segundo Ferreira (1998), é uma Manutenção preventiva efectuada segundo um plano estabelecido segundo o tempo ou número de unidades de utilização, tendo por objectivo manter o sistema num estado de funcionamento equivalente ao inicial. As intervenções sistemáticas deverão ser programadas, tendo em atenção os dados do fabricante do

equipamento e os resultados operacionais evidenciados. Contudo, Xia (1998) refere que se a Manutenção preventiva for executada com demasiada frequência os sistemas perderão disponibilidade para a produção, o que contribui para consequentes perdas de produção. Assim, a preocupação principal no planeamento da Manutenção preventiva deverá ser determinar os intervalos óptimos para as acções de Manutenção preventiva;

- Manutenção condicionada é um tipo de Manutenção subordinada à evolução de parâmetros e condições funcionais de um determinado equipamento ou sistema para decidir o momento de uma determinada intervenção. Neste tipo de Manutenção (Ferreira, 1998), a decisão de intervenção preventiva é tomada quando existe evidência experimental de avaria iminente ou que se aproxima do limite de degradação admissível pré-determinado. Segundo Cabral (1998), o sucesso deste tipo de Manutenção depende da eficácia dos recursos e da metodologia para vigiar o estado do equipamento e a sua funcionalidade dentro dos limites aceitáveis. Pinto (1995) refere que este tipo de Manutenção obriga, em geral, à aplicação de aparelhagem complexa e bastante dispendiosa que, dificilmente, as empresas conseguem rentabilizar, exceptuando nas empresas de grande dimensão em que se justifica economicamente a aplicação de tal aparelhagem. Muitas empresas subcontratam este tipo de Manutenção para determinados equipamentos, pois nem sempre é justificável para a totalidade dos equipamentos (ex: medição e análise de vibrações, análise de óleos lubrificantes, termografia, entre outros). Esta Manutenção é por vezes designada Manutenção baseada na condição.

Em Xia (1998) é descrita uma outra modalidade da Manutenção denominada por oportunista. Poder-se-á descrevê-lo como um caso especial da Manutenção preventiva mas, executada perante uma intervenção correctiva. Para Xia (1998), a Manutenção oportunista é um tipo especial de Manutenção preventiva que é executada quando outros sistemas ou equipamentos estão submetidos a acções de Manutenção correctiva ou preventiva. Este tipo de Manutenção é normalmente

praticado em sistemas de laboração contínua, de modo a garantir a sua maior disponibilidade para a produção.

O termo conservação deverá ser diferenciado de Manutenção. No entanto, para muitas empresas não existe qualquer distinção entre estes. Poder-se-á definir conservação como o conjunto de acções destinadas a manter os bens armazenados em condições de operacionalidade. Este termo deve empregar-se para referir a Manutenção dirigida ao material em armazém, seja ele um equipamento ou uma peça de reserva. Utiliza-se mais genericamente o termo Manutenção para o parque de máquinas e instalações em funcionamento. No entanto, Ferreira (1998) estabelece uma distinção entre os dois termos (Manutenção e conservação), com base numa evolução de conceito, que divergem do raciocínio anterior. Para a conservação, Ferreira (1998) atribui uma função de “desenrascar” e reparar um parque material a fim de assegurar a continuidade da produção, já a Manutenção é escolher os meios de prevenir, de corrigir ou renovar um parque material, seguindo um critério económico, a fim de otimizar o custo global de posse do equipamento.

### **3.3.2. Plano de Manutenção ou Programa de Manutenção**

Para uma Manutenção programada e organizada com antecedência, deverão ser fixadas as tarefas, os métodos e os recursos necessários para as intervenções de Manutenção a executar. O plano de Manutenção deverá conter o conjunto de acções baseado no tempo, descrevendo as actividades de Manutenção específica e a períodos definidos. O plano de Manutenção determina a qualidade do trabalho da Manutenção.

Pinto (1995) refere que a preparação do programa de Manutenção é uma actividade que requer experiência, pois não só as actividades de Manutenção devem ser indicadas como também a periodicidade do trabalho deve ser fixada tendo em conta as características e a disponibilidade do equipamento. Dentro do período de garantia dos equipamentos devem obviamente tomar-se precaução de forma a operar-se

com eles em conformidade com quaisquer instruções que façam parte do contrato com o fornecedor de modo a assegurar as garantias dadas por este.

### **3.3.3. Manutibilidade**

Segundo Ferreira (1998), manutibilidade é a probabilidade de recuperar um sistema nas condições de funcionamento especificadas, em prazos de tempo estabelecidos, quando as acções de Manutenção são efectuadas nas condições e com os meios previstos.

Assis (1997) afirma que a manutibilidade representa tudo o que poderá influenciar a aptidão de um sistema para receber Manutenção (facilidade de acesso, condições de segurança, precisão, economia). A manutibilidade dos sistemas está directamente relacionada com a rapidez e facilidade com que as intervenções de Manutenção podem ser realizadas (Pinto, 1999).

Ferreira (1998) apresenta ainda uma definição para manutibilidade como sendo a fiabilidade com que as reparações e o restante trabalho da Manutenção é efectuado e afecta directamente a disponibilidade dos equipamentos para efectuarem o serviço requerido. Pois, o tempo gasto na reparação de avarias e nas acções de Manutenção preventiva contribuem para a diminuição do tempo de exploração dos sistemas.

### **3.3.4. MTBF e MTTR**

A Manutenção pode servir-se de indicadores (índices), que sem exprimir toda a verdade sobre a realidade dos sistemas em estudo, são uma informação útil na avaliação do comportamento dos sistemas, nomeadamente, na ocorrência de falhas, nos tempos de reparação e na disponibilidade dos equipamentos.

Assim, poder-se-ão apresentar dois indicadores essenciais: o MTBF e o MTTR.



O tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between Failures*), segundo Cabral (1998), para um determinado sistema, exprime o tempo médio de bom funcionamento, ou seja, o tempo que decorre, em média, entre duas avarias consecutivas, ou numa outra aceção, o tempo médio entre acções de Manutenção correctiva.

Para um determinado período de tempo, o MTBF será:

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} \quad (3.1)$$

Onde:

$\sum TBF$  = Total de horas de bom funcionamento do sistema;

$N$  = Total de falhas ou avarias do sistema.

O MTBF é também um quantificador da Fiabilidade de sistemas, uma vez que o seu valor, uma vez calculado, expressa a aptidão do sistema para funcionar durante um determinado período de tempo em boas condições.

Um outro indicador algo parecido ao MTBF (Cabral, 1998), é o tempo médio para falhar (MTTF – *Mean Time To Failure*), que é um conceito idêntico, mas que apenas se aplica a sistemas não reparáveis.

O tempo médio de reparação (MTTR – *Mean Time To Repair*), segundo Cabral (1998), exprime o tempo médio necessário para reparar uma avaria, isto é, a média dos tempos de intervenção para Manutenção correctiva.

Para um determinado período de tempo, o MTTR será:

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} \quad (3.2)$$

Onde:

$\sum TR$  = Total de horas de reparação do sistema;

$N$  = Total de falhas ou avarias do sistema.

Este indicador (MTTR), é primordialmente uma medida da manutibilidade do equipamento, isto é, indica a aptidão do sistema para ser reparado para uma condição de bom funcionamento.

### 3.3.5. Disponibilidade

O termo disponibilidade suger uma noção de tempo, durante o qual determinado equipamento está disponível para a operação.

Aumentar a disponibilidade de um equipamento consiste em reduzir o número de paragens e em reduzir o tempo de reparação ou das intervenções preventivas da Manutenção. Segundo Ferreira (1998), este é o objectivo clássico dos serviços de Manutenção e implica o aumento da fiabilidade dos equipamentos (MTBF) e a diminuição dos tempos de intervenção (MTTR).

A disponibilidade pode ser calculada por:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.3)$$

Ou seja, a probabilidade de um sistema, segundo condições de Fiabilidade e manutibilidade definidas, realizar uma determinada função num instante de tempo ou num período definido.

A indisponibilidade ou “não disponibilidade” pode ser calculada por:

$$I = (1 - A) \quad (3.4)$$

A indisponibilidade caracteriza o tempo de inactividade dos sistemas (tempo de não-produção), e pode-se definir como a probabilidade de um sistema não realizar a sua função num determinado instante de tempo ou num período definido.

Uma vez que os indicadores, disponibilidade e indisponibilidade, são obtidos a partir de valores médios (MTBF e MTTR), então deve-se referir que os resultados de “A” e “I” são relativamente ao sistema, a disponibilidade média e a indisponibilidade média respectivamente.

### 3.3.6. Fiabilidade

Embora exista a necessidade de quantificar o número de falhas no tempo, perante a incerteza, relativamente ao momento em que as falhas ocorrem, apenas é possível o estudo probabilístico dos acontecimentos de falha.

A Fiabilidade, muitas vezes designada por Análise de Sobrevivência (*Survival Analysis*), constitui um método de análise estatística para estudar as ocorrências e os respectivos tempos dos acontecimentos (Dias, 2002).

Ferreira (1998) define Fiabilidade como sendo a característica dum dispositivo expressa pela probabilidade de exercer uma função requerida em condições de utilização e por um período de tempo determinado.

Sendo o conceito de Fiabilidade uma probabilidade significa que qualquer tentativa para a quantificar terá que utilizar métodos estatísticos (O'Connor, 2002).

Segundo O'Connor (2002), a Fiabilidade é quantificada de diversas formas, podendo ser calculada através do número médio de falhas num determinado período de tempo (taxa de falhas), ou tempo médio entre falhas (MTBF) para sistemas que podem ser reparados e novamente utilizados, ou como tempo até falhar para sistemas não reparáveis (MTTF). Contudo, O'Connor (2002) refere que para sistemas reparáveis, é normalmente assumido que as falhas ocorrem a uma taxa constante, pois trata-se de um caso particular, considerado, por acontecer muitas vezes e ser mais fácil de compreender. Nestes casos, o cálculo da taxa de falhas é o inverso do MTBF.

O objectivo fundamental dos estudos de fiabilidade deverá ser sempre fornecer a informação necessária à tomada de decisão (Dias, 2002). Antes de iniciar um estudo de fiabilidade, deve-se clarificar, objectivamente, o tipo de problema, os objectivos, as condições de fronteira e as limitações do estudo em função da informação disponível. Segundo Dias (2002), a forma como são obtidos os dados pode condicionar o tipo de aplicação estatística a utilizar.

### 3.3.7. Equipamento Redundante

Equipamento instalado em paralelo com outro similar, podendo funcionar alternativamente em qualquer momento. O grau de complemento do equipamento redundante pode ser diverso, podendo ir desde um equipamento completo até sistemas de menor dimensão que o componham. Este meio auxiliar é utilizado em situações em que a interrupção da produção tem custos elevados e portanto é necessário limita-la a valores muito reduzidos.

Em sistemas de laboração contínua é frequente a utilização de equipamentos redundantes como meio de garantir uma determinada Fiabilidade e disponibilidade global.

### 3.4. Sistemas Reparáveis/Não Reparáveis

Um sistema reparável (SR) pode ser definido como um conjunto de vários componentes associados para realizarem uma ou mais funções que, após cada avaria, são reparados para desempenhar a sua função. Um SR pode falhar mais do que uma vez. São considerados sistemas reparáveis, aqueles que cuja ocorrência de avaria não significa o seu fim de vida.

O'Connor (2002) refere que para os SR, a Fiabilidade, é a probabilidade de uma falha não ocorrer para um determinado período de interesse. A taxa de ocorrência de falhas (ROCOF – *Rate Of Occurrence Of Failure*) também pode ser calculada. Contudo a taxa de falhas expressa a probabilidade instantânea de falha por unidade de tempo.

Segundo O'Connor (2002), a Fiabilidade dos SR pode também ser caracterizada pelo MTBF (*Mean Time Between Failure*), mas apenas na condição de presença de uma taxa de falhas constante. Assim, a disponibilidade também poderá ser calculada, desde que se conheçam os tempos de reparação.

Um sistema não reparável pode ser definido como um conjunto de vários componentes associados para a realização de uma ou mais funções, mas que por

razões económicas ou tecnológicas, não é viável a sua reparação. São considerados sistemas não reparáveis, aqueles que cuja ocorrência de avaria significa o seu fim de vida. Logo, a falha só ocorre uma vez e o sistema terá de ser substituído.

Normalmente o entendimento de não reparável é mais associado aos componentes ou peças simples, cuja falha implica a sua inutilidade. Uma lâmpada é um dos exemplos mais claros de um componente não reparável. Para os componentes será importante o conhecimento da distribuição estatística que modela o seu tempo de vida, por forma a poder estimar a melhor periodicidade de substituição preventiva.

Os sistemas reparáveis são, frequentemente, sujeitos a acções de Manutenção que podem influenciar os intervalos de tempo entre falhas. Assim, ao iniciar qualquer estudo, é fundamental analisar a tendência e a independência dos dados disponíveis, considerando a ordem cronológica das falhas. O comportamento do sistema ao longo do tempo permite prever a sua tendência e adequar o Processo de Poisson que melhor modela o comportamento do mesmo.

### **3.5. Análise Estatística das Falhas**

Na análise estatística de sistemas reparáveis é fundamental considerar a ordem cronológica das falhas. Este facto pressupõe que se equacionem duas variáveis métricas importantes: o tempo de vida do sistema no momento da avaria e o tempo desde a última falha. Nem sempre estas duas variáveis são consideradas em separado, dando origem a algumas incorrecções no estudo da Fiabilidade de sistemas reparáveis.

No tratamento das variáveis métricas é importante considerar alguns aspectos que são comuns aos diferentes métodos. Podem-se resumir, essencialmente, os dois aspectos de partida para a análise e tratamento de dados de tempo:

- Recolha e tratamento de dados com a presença de valores censurados ou suspensos;

- Escolha da escala mais adequada para a variável métrica.

Os dados censurados aparecem de várias formas e ocorrem por múltiplas razões. A distinção mais vulgar é entre dados censurados à esquerda e dados censurados à direita. Segundo Leitão (1989), em aplicações práticas é vulgar considerar apenas os dados censurados à esquerda. Estas observações de tempo correspondem a situações onde o sistema reparável ou o componente não falha mas abandona o período de ensaio. Assim, tem-se apenas parte da informação, ou seja apenas se sabe que funcionou até um valor de tempo conhecido sem avariar, desconhecendo-se o valor de tempo da próxima avaria. Para estas situações Leitão (1989) considera que as últimas observações são mais relevantes que as iniciais, desprezando ou considerando como não censurados os valores de tempo censurados à esquerda.

Para O'Connor (2002), a preparação de bases de dados com registos rigorosos de todas as ocorrências que de alguma forma possam influenciar a Fiabilidade, são um elemento de trabalho imprescindível. Não devem também ser desprezados os acontecimentos exteriores e mudanças de condições de trabalho que têm acção directa sobre o fenómeno Fiabilidade.

Uma análise de frequência de falha permite quantificar e verificar as causas de falha que mais contribuem para uma determinada tendência da taxa de falhas de um sistema. Segundo O'Connor (2002), a grande dificuldade associada ao cálculo da Fiabilidade, é a quantificação das diferentes contribuições das diversas causas de falha que a influenciam, tornando-se um exercício de incerteza, sempre dependente dos dados disponíveis para o estudo estatístico.

Na análise dos dados de falha também poderá ser considerada a elaboração de diagramas de Pareto. Segundo Ferreira (1998), os diagramas de Pareto ou diagramas de barras permitem melhor visualizar qual ou quais as prioridades da análise dos componentes que sofrem avarias. Para a construção do diagrama de Pareto, geralmente, os componentes são agrupados por famílias que serão apresentadas no eixo das abcissas. No eixo das ordenadas pode ser representado o número de avarias registadas por família. Poder-se-á também traçar a curva ABC de

Pareto, que dá uma ideia global das prioridades a adoptar nas acções de melhoria dos equipamentos.

O'Connor (2002) refere que na análise de Fiabilidade, o diagrama de Pareto pode ser uma boa ferramenta para distinguir as causas de falha mais significativas das menos significativas no processo de falha.

### 3.6. Taxa de Falhas

A taxa de falhas é a principal medida da Fiabilidade e é definida como a derivada em ordem ao tempo do número esperado de falhas. Segundo Dias (2002), a taxa de falhas tem a ver com o processo estocástico que modela o número de falhas ao longo do tempo.

Um sistema reparável poderá estar sujeito a várias falhas dependentes ou não de factores internos ou externos ao próprio sistema que podem influenciar a sua taxa de ocorrência de falhas (ROCOF – *Rate Of Occurrence Of Failures*).

O'Connor (2002) refere que as falhas que ocorrem, aleatoriamente, em sistemas reparáveis e que não podem ser representados por uma função de distribuição contínua, são um exemplo de uma série de acontecimentos discretos. Segundo O'Connor (2002), estas situações são chamadas de Processos Estocástico Pontuais (*Stochastic Point Process*) e podem ser analisadas usando métodos estatísticos de séries de acontecimentos.

Quando se pretendem analisar dados de um Processo Estocástico Pontual, é importante determinar se o processo tem tendência, isto é, saber se a taxa de falhas está a crescer, decrescer ou está constante (O'Connor, 2002).

O'Connor (2002) aconselha a utilização do teste de Laplace para analisar a possibilidade da presença de possíveis Processos de Poisson.

Um Processo de Poisson, na vertente *soft* da Gestão da Manutenção, consiste numa sequência de ocorrências de falha ou avaria de um sistema reparável, durante o seu

período de funcionamento. Na Figura 3.2 está representada, a título de exemplo, uma sequência de ocorrências de falha, para um determinado período de funcionamento, onde  $\tau$  representa o tempo de vida do sistema no momento da falha ou a idade do sistema em cada falha.

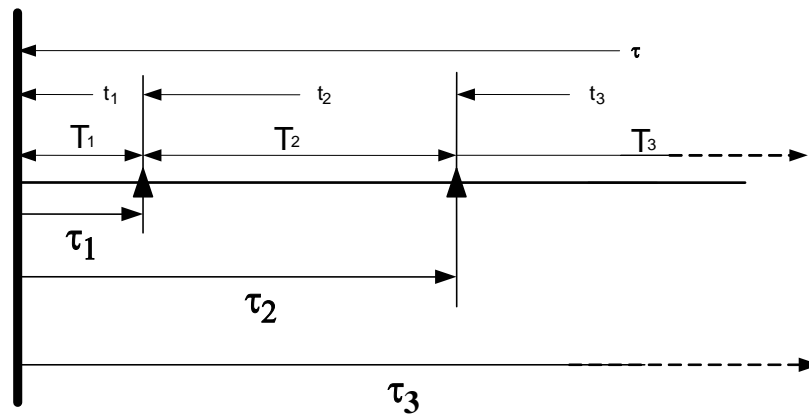


Figura 3.2 – Exemplo de um Processo Estocástico Pontual

Fonte: Dias (2002)

Considerando que o sistema reparável é constituído por um ou mais componentes, a sequência de falhas indicada pode ser devida à falha de um mesmo componente ou de componentes distintos. Para a primeira falha ter-se-ia, por exemplo, uma função de probabilidade de falha  $F_1(t) = P(T_1 \leq t_1)$  dada por  $P(T_1 \leq t_1) = \int_0^{t_1} f_1(u) du$  e assim sucessivamente, para as restantes falhas. Então, estamos perante um conjunto de variáveis aleatórias distintas: Idade do sistema no momento da falha ( $\tau$ ) e tempo desde a última falha ( $T$ ) que depende da função de probabilidade que modela o tempo de vida do componente que falha na posição  $i$ .

A dificuldade surge, frequentemente, quando os tempos desde a última falha podem ser modelados por uma distribuição estatística. Se esta distribuição estatística é a distribuição exponencial negativa, caracterizada por uma função de risco constante então, é vulgar considerar que se trata de um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) esquecendo a sequência cronológica das falhas.



A taxa de falhas pode ser decrescente, crescente ou constante. A cada um destes casos, corresponde uma situação particular no que respeita à Fiabilidade. Para O'Connor (2002), a uma taxa de falhas decrescente corresponde uma “Fiabilidade crescente”, taxa de falhas crescente, corresponde a Fiabilidade decrescente e a uma taxa de falhas constante significa falhas independentes e identicamente distribuídas.

Segundo Dias (2002), quando o sistema é acompanhado ao longo de um grande período de observação, é recomendado o cálculo do tempo cumulativo médio entre falhas (*CMTBF*). Este valor, que corresponde ao inverso da taxa cumulativa de falhas, permite fazer uma análise da evolução do sistema ao longo do período de observação. Assim, dividindo o período de observação em vários subintervalos é possível estimar a taxa de falhas, para cada intervalo. O valor para o subintervalo  $i$  pode ser estimado por:

$$\hat{\rho}_i(\tau) = \frac{N_i(\tau) - N_{i-1}(\tau)}{\Delta \tau} \quad (3.5)$$

Onde  $N_i(\tau)$  é o número total de falhas observadas desde  $\tau = 0$  até ao fim do intervalo  $i$  e  $\Delta \tau$  é a duração de cada subintervalo. Nestas circunstâncias o estimador natural do tempo médio entre falhas acumulado (*CMTBF*) pode ser obtido por:

$$\hat{CMTBF} = \frac{\Delta \tau}{N_i(\tau) - N_{i-1}(\tau)} \quad (3.6)$$

Este estimador representa o tempo médio entre falhas para cada um dos intervalos considerados. Pode ser de grande utilidade em virtude da sua análise ao longo do tempo permitir uma avaliação rápida do comportamento do sistema.

### 3.7. Teste de Laplace

O teste de Laplace é utilizado em Fiabilidade para proceder a um estudo prévio da taxa de falhas, no sentido de conhecer a sua evolução e permitir, então, identificar o comportamento do sistema num dado intervalo de tempo.

O teste de Laplace, baseado numa estatística amostral, permite verificar se a taxa de falhas é constante ou se, pelo contrário, apresenta alguma tendência. Dias et al. (1999) utilizam o teste de Laplace para testar a presença de um possível Processo de Poisson. Para um teste limitado por tempo a expressão a aplicar será:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] \quad (3.7)$$

onde  $T_0$  representa o tempo de duração do teste,  $\tau_i$  corresponde à ordem cronológica da falha, ou seja, a idade do sistema no momento da falha e  $n_f$  o número total de falhas para o período de teste considerado.

No pressuposto de um Processo de Poisson o valor da estatística amostral segue uma distribuição Normal reduzida com média zero e variância unitária. A hipótese nula,  $H_0$  ou seja, a hipótese de se estar a tender para um Processo de Poisson Homogéneo (PPH), será rejeitada se  $Z_0$  for superior ao valor crítico, para um determinado nível de significância  $\alpha$ . Isto é, se  $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ , então rejeita-se  $H_0$  e está-se perante um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH).

Nas circunstâncias em que os valores de  $Z_0$  são positivos e fora do intervalo de confiança, prenuncia-se a presença de um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH) com tendência para taxa de falhas crescente e para valores negativos, a tendência para taxa de falhas decrescente. Para valores de  $Z_0$  dentro do intervalo de confiança está-se perante um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) com uma taxa de falhas constante. Porém, o sinal do valor de  $Z_0$  pode prenunciar uma ligeira tendência (crescente ou decrescente consoante o sinal) da taxa de falhas.

Uma análise gráfica representando os tempos de vida do sistema no momento da falha, poderá consistir uma ótima ferramenta para uma percepção visual do comportamento do sistema reparável e verificar a possível tendência da taxa de falhas. Perante esta análise poder-se-á verificar se existe aumento dos intervalos de tempo entre falhas prenunciando uma taxa de falhas decrescente ou se pelo contrário apresenta uma tendência crescente. Se for possível ajustar uma recta ao conjunto de pontos que representam as falhas o sistema segue um Processo de Poisson Homogéneo e denuncia uma taxa de falhas constante. No entanto, a representação gráfica, apesar de permitir uma avaliação visual do comportamento do sistema relativamente à taxa de falhas, não deve dispensar a utilização do teste de Laplace.

Esta metodologia estatística (teste de Laplace), pode ser encontrada em O'Connor (2002), onde o autor, para além de desenvolver o tema, apresenta alguns exemplos práticos.

Segundo O'Connor (2002), uma condição essencial de qualquer Processo Homogéneo de Poisson, é a probabilidade dos acontecimentos a ocorrer em qualquer período, ser independente do que ocorreu em períodos precedentes. Um PPH descreve a sequência de independente e identicamente exponencialmente distribuído (IID) das variáveis aleatórias. Um PPNH descreve uma sequência de variáveis aleatórias que não é independente, nem identicamente distribuída.

Numa aplicação a redes de distribuição de energia eléctrica, Dias *et al.* (1997b) analisam, com algum detalhe, uma aplicação do teste de Laplace para identificar se os dados, pertencentes a uma amostra, apresentam um comportamento homogéneo.

### 3.8. Processos de Poisson

Uma vez que a área da análise estatística, referente aos processos estocásticos, é muito vasta, neste número são apresentadas apenas o conjunto de técnicas desenvolvidas para os modelos de processos estatísticos pontuais que são

potencialmente aplicáveis aos sistemas reparáveis, nomeadamente os mais aplicados na indústria e que mais relevo apresentam para o estudo pretendido.

Como os sistemas reparáveis são frequentemente sujeitos a acções de Manutenção preventiva e correctiva que podem influenciar os intervalos de tempo entre avarias, Dias et al. (1999), considera que ao iniciar-se qualquer estudo é fundamental analisar a tendência dos dados disponíveis.

A análise de qualquer sistema reparável deve ser efectuada com uma amostra de dados significativa e será necessário conhecer a ordem cronológica das ocorrências. Para sistemas reparáveis o número de falhas segue, tipicamente, um Processo de Poisson (Dias, 2002).

São vários os autores a utilizar o teste de Laplace para identificar se os dados pertencentes a amostras que apresentam comportamentos homogéneos. Em Dias et al. (1999) é demonstrada a utilização de processos estocásticos pontuais na análise do comportamento de uma rede de distribuição de energia eléctrica. Para tal, Dias et al. (1999) modelaram uma amostra de dados de tempos de falha referentes ao sistema reparável, onde utilizaram o teste de Laplace para caracterizar a tendência da taxa de falhas do sistema para o período de estudo considerado.

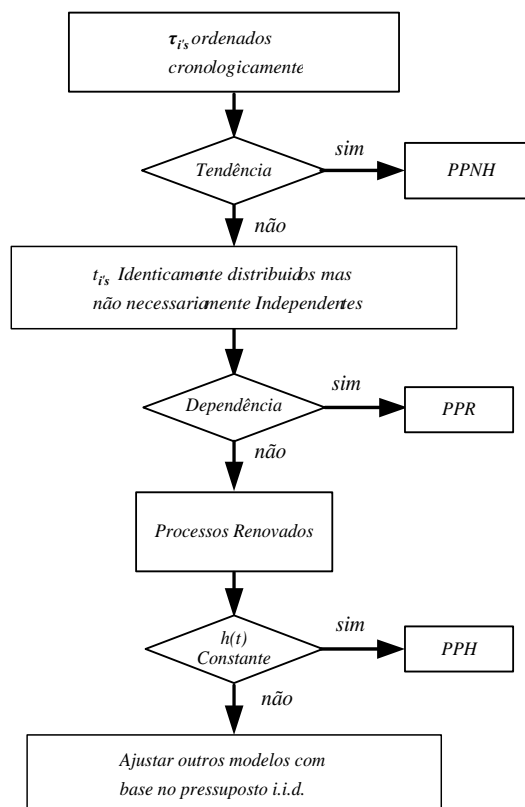
Stillman (1999) utiliza também o teste de Laplace para confirmar a presença de um Processo de Poisson Homogéneo num estudo comparativo de dois sistemas reparáveis. Stillman (1999) recorre ainda à análise gráfica entre o número cumulativo de falhas, versus o tempo cumulativo de funcionamento dos sistemas, considerando que deverá ser o primeiro passo num estudo em que se pretende analisar o comportamento global de sistemas reparáveis.

Ansell e Phillips (1989) usam também o teste de Laplace no seu estudo e referem que este teste pode ser usado para testar a tendência da taxa de falhas em sistemas reparáveis.

Em Bohoris (1996a) e Bohoris (1996b) também está bem evidente que o uso do teste de Laplace é um teste estatístico apropriado para verificar a tendência da taxa de falhas em sistema reparáveis.

Os modelos de Processo Estocásticos Pontuais possíveis de aplicar aos sistemas reparáveis devem considerar o tipo de Processo de Poisson associado aos dados. Em função do comportamento aleatório ou não dos dados podem-se considerar vários Processos de Poisson.

Considerando a ordem cronológica das falhas e utilizando testes estatísticos, nomeadamente, o teste de Laplace, é possível identificar os vários tipos de processos estocásticos pontuais. A figura 3.3 apresenta sob a forma de fluxograma o processo de identificação do modelo mais apropriado para cada caso.



**Figura 3.3 – Análise estatística da ordem cronológica das falhas**

Fonte: Dias (2002)

Dias (2002) refere que é vulgar considerar que um sistema, com um grande número de componentes, quando não apresenta tendência constitui um PPH. A sua taxa de falhas, em regime estacionário, tende para um valor constante.

### **3.8.1. Processos de Poisson não Homogêneos (PPNH)**

Ansell e Phillips (1989) afirmam que o resultado do teste de Laplace indica se se está perante um modo estacionário ou não e que em caso afirmativo, o segundo passo será testar a independência dos dados de falha para decidir se o Processo de Poisson Homogéneo pode ser mesmo usado.

Um Processo de Poisson Não Homogéneo caracteriza-se por uma taxa de falhas dependente do tempo significando que, ao longo do tempo, os intervalos de tempo entre falhas tendem a aumentar ou a diminuir.

Assim poder-se-á estar perante um sistema reparável com taxa de falhas decrescente (ROCOF decrescente) ou com taxa de falhas crescente (ROCOF crescente).

#### **3.8.1.1. Sistemas com Taxa de Falhas Decrescente**

Nos sistemas com um ROCOF decrescente existe uma tendência para o aumento dos intervalos de tempo entre falhas. Um sistema com uma taxa de falhas decrescente quer dizer que a sua Fiabilidade melhora ao longo do tempo. Logo se for analisado do ponto de vista da Manutenção, poder-se-á concluir que as intervenções efectuadas após cada avaria tendem a melhorar a Fiabilidade do sistema.

Segundo Dias (2002), os sistemas com tendência para uma taxa de falhas decrescente podem ser analisados utilizando o modelo de Crow, também designado por "Modelo de Fiabilidade Crescente", que constitui uma reformulação do modelo de Duane. Este modelo permite estimar a taxa de falhas e consequentemente estimar o valor do MTBF para as falhas mais recentes. Este modelo permite também definir intervalos de confiança para o MTBF estimado.

O número de falhas por unidade de tempo de um sistema reparável pode ser definido por:

$$\rho(\tau) = \frac{d\{E[N(\tau)]\}}{d\tau} \quad (3.8)$$

Onde o número esperado de falhas representado por  $E[N(t)]$ , será:

$$E[N(\tau)] = \hat{\lambda} \tau^\beta \quad (3.9)$$

Assim, segundo o modelo de Crow a estimativa da taxa de falhas será dada por:

$$\rho = \hat{\lambda} \cdot \beta \cdot \tau^{(\beta-1)} \quad (3.10)$$

Onde  $\tau$  representa o tempo de duração do teste. A estimativa das constantes do modelo pode ser facilmente obtidas pela função de máxima verosimilhança. Para dados censurados por tempo as estimativas de  $\beta$  e  $\hat{\lambda}$  são respectivamente,

$$\beta = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f} \ln \frac{T}{\tau_i}} \quad (3.11)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T^\beta} \quad (3.12)$$

Onde  $T$  representa o tempo total de duração do teste e, como anteriormente,  $\tau_i$  o tempo de vida no momento da falha do sistema e  $n_f$  é o número total de falhas para o período de teste considerado.

O inverso da taxa de falhas, para as falhas mais recentes será dado por:

$$\theta = \frac{1}{\hat{\lambda} \cdot \beta \cdot \tau^{(\beta-1)}} = \frac{1}{\rho} \quad (3.13)$$

O número de falhas por unidade de tempo de um sistema reparável pode ser definido por:

Os intervalos de confiança para o MTBF estimado serão:

$$\text{Limite inferior:} \quad \theta_l = \theta \cdot \pi_1 \quad (3.14)$$

$$\text{Limite superior:} \quad \theta_s = \theta \cdot \pi_2 \quad (3.15)$$

Os valores de  $\pi_1$  e  $\pi_2$ , são obtidos directamente das respectivas tabelas (anexo IV), para o intervalo de confiança desejado.

Kobbacy e Jeon (2002) recorrem ao modelo de Crow, após o teste de tendência da taxa de falhas com o teste de Laplace, com o objectivo de otimizar eficientemente a programação da Manutenção preventiva de sistemas reparáveis.

Doyen e Gaudoin (2002) também se referem ao modelo de Crow, como o mais usual no ajuste das acções de Manutenção preventiva e de reparações mínimas.

### **3.8.1.2. Sistemas com Taxa de Falhas Crescente**

Nos sistemas com um ROCOF crescente os intervalos de tempo entre falhas tendem a diminuir ao longo do tempo prenunciando a degradação ou uma eventual tendência de envelhecimento do sistema. Um sistema com uma taxa de falhas crescente quer dizer que a sua Fiabilidade piora ao longo do tempo.

Segundo O'Connor (2002), quando estamos perante uma taxa de falhas significativamente crescente, não interessa utilizar estimadores, mas determinar as causas das avarias ou verificar se o equipamento está no seu final de vida.

Perante um cenário em que um sistema reparável apresenta uma taxa de falhas crescente, existe evidência de falhas a contribuírem negativamente para a sua Fiabilidade. Será necessário uma análise detalhada a todos os pressupostos que poderão estar a influenciar o comportamento do sistema. As causas possíveis podem ser uma Manutenção deficiente, uma tendência natural do envelhecimento do equipamentos ou determinados componentes, uma alteração na operacionalidade do processo produtivo que esteja a interferir no normal funcionamento do sistema, entre outras.

Dias (2002) apresenta 3 situações possíveis para a ocorrência de uma taxa de falhas crescente num sistema reparável que, dependendo dos dados disponíveis, não deverão deixar de ser analisadas:



- Existe uma causa assinalável, por exemplo a influência de um operador, que pode provocar a tendência verificada nos dados; nestes casos, após correcção da causa especial, o sistema deverá apresentar um comportamento aleatório;
- Componentes com função de risco crescente estão a influenciar o comportamento do sistema; nestes casos, uma intervenção de Manutenção, nos referidos componentes, pode ser a solução mais correcta;
- O sistema atinge o termo da sua vida útil não se justificando modelar o seu comportamento.

Perante a ocorrência de uma taxa de falhas crescente, não faz sentido o cálculo ou estimativa do MTBF para esse período de estudo. Se for calculado, o MTBF traduzirá o valor médio de bom funcionamento de todo o período de estudo considerado, o que induzirá em erro como indicador da Fiabilidade do sistema. Para as últimas ocorrências, um sistema com taxa de falha crescente terá um tempo de funcionamento entre falhas inferior ao valor médio para o período inteiro. Assim, será aconselhável distinguir esses valores, relativamente a outros que na realidade estejam mais correctos.

Para períodos com taxa de falhas crescente distinguir-se-á esse valor com o tempo cumulativo médio entre falhas (*CMTBF*).

Para um determinado período de tempo, o CMTBF será:

$$CMTBF = \frac{\sum TBF}{N} \quad (3.16)$$

Este estimador representa o tempo médio entre falhas para um dado intervalo considerado. Poderá ter interesse, numa perspectiva da Gestão da Manutenção, relativamente a análises de custos.

### 3.8.2. Processos de Poisson Ramificados (PPR)

Neste processo, uma série de acontecimentos primários é gerada por um Processo de Poisson Homogêneo e cada acontecimento primário tem possibilidade de gerar acontecimentos dependentes (Dias, 2002). Esta sequência de acontecimentos subsidiários pode estar relacionada com um desempenho deficiente da Manutenção que, após a ocorrência de uma falha, pode provocar uma série de falhas dependentes da intervenção anterior. A sua aplicação em termos práticos é bastante difícil, em virtude da dificuldade emergente da separação dos acontecimentos subsidiários dos primários (Dias, 2002).

### 3.8.3. Processos de Poisson Homogêneos (PPH)

Um Processo de Poisson Homogêneo caracteriza-se por uma taxa de falhas constante no tempo (ROCOF constante). Numa possível representação gráfica do número de falhas em função do tempo de vida do sistema no momento da falha, os dados apresentarão uma sequência aleatória.

Dias et al. (1999) referem que em circunstâncias particulares associadas a aspectos físicos dos sistemas em análise, pode existir a necessidade de testar a dependência dos dados utilizando os princípios da autocorrelação. Em situações práticas é suficiente considerar o teste de Laplace para assumir o pressuposto IID (independentes e identicamente distribuídos). Dias et al. (1999) afirmam ainda que os dados em que os intervalos de tempo entre falhas são IID, pertencem aos denominados Processos Renovados (RP – *Renewal Process*). Neste caso, se o número de dados for suficiente pode-se ajustar uma distribuição estatística e a partir dela calcular a Fiabilidade do sistema.

Segundo Dias (2002), um Processo de Renovação (*Renewal Process*) pode ser definido como uma sequência interminável de variáveis aleatórias positivas independentes e identicamente distribuídas (IID), o qual constitui a generalização do Processo de Poisson Homogêneo. Então, um PPH será definido como uma

sequência interminável de variáveis aleatórias positivas exponencialmente distribuídas.

Dias (2002) refere que nestas condições, a expressão 3.17 permite calcular a Fiabilidade do sistema reparável, para um determinado intervalo de tempo  $\Delta\tau$ , onde  $\lambda$  representa a taxa de falhas do sistema:

$$R(\Delta\tau) = e^{-\lambda\Delta\tau} \quad (3.17)$$

Esta expressão representa a generalização do Processo de Poisson para um sistema com um número médio de falhas  $m = \lambda \Delta\tau$ , para um intervalo de tempo  $\Delta\tau$ , e corresponde, para a distribuição de Poisson, à probabilidade de zero avarias, que pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$P(X = k) = \frac{e^{-m} m^k}{k!} \quad (3.18)$$

A expressão 3.18 representa a função densidade de probabilidade da ocorrência de  $k$  avarias, o que para  $k = 0$  daria  $P(X = 0) = e^{-m}$ .

### 3.8.3.1. Sistemas com Taxa de Falhas Constante

Para uma taxa de falhas constante de um sistema reparável, na representação gráfica do número de falhas em função do tempo de vida no momento da falha, apesar dos dados apresentarem uma sequência aleatória, será possível ajustar uma recta ao percurso dos pontos. Assim, o sistema não apresenta tendência e segue um Processo de Poisson Homogéneo (PPH). Esta representação gráfica não deve dispensar a utilização do teste de Laplace, como modo de comprovar a análise prévia.

Para estes casos, O'Connor (2002) refere que se pode analisar a Fiabilidade com o cálculo do MTBF (*Mean Time Between Failure*), uma vez que as falhas são independentes e identicamente distribuídas.

Como a distribuição estatística é a distribuição exponencial negativa, caracterizada por uma função de risco constante então, esquecendo a sequência cronológica das falhas, o inverso do MTBF dará o valor da taxa de falhas:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (3.19)$$

E o número médio de falhas será  $N(\tau) = \lambda\tau$ , onde  $\tau$  representa o tempo do período de tempo de funcionamento do sistema.

No entanto, o facto de o sistema se comportar como um PPH, e de os tempos desde a última falha seguirem uma distribuição Exponencial negativa, não significa que os componentes que o compõem apresentem uma função de risco constante (Dias et al., 1999).

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISE E MODELAÇÃO DAS FALHAS DO SISTEMA DE COZEDURA

### 5.1. Introdução

O objectivo fundamental dos estudos de Fiabilidade deverá ser sempre fornecer a informação necessária à tomada de decisão (Dias, 2002).

Pretende-se neste capítulo avaliar o comportamento do sistema de cozedura do cimento nos 4 períodos, dos quais foram seleccionados dados referentes à ocorrência de falhas (anexo III). Para tal, recorrer-se-á à análise da sequência das falhas com o teste de Laplace que permite testar a presença de possíveis Processos de Poisson. Recorrer-se-á também à análise gráfica, como complemento demonstrativo da tendência das falhas observadas. Após a análise e o estudo desses dados, segundo os modelos estatísticos apresentados no capítulo 3, serão comentados os resultados, clarificando o cenário encontrado na modelação das falhas.

O registo dos dados por ordem cronológica foi fundamental na avaliação do comportamento global do sistema. A informação recolhida possibilitou também apresentar uma análise de frequência do número de observações por causa de falha nos 4 períodos de estudo, permitindo identificar quais e detalhar razões para as respectivas ocorrências.

Para melhor entendimento dos dados observados e de resultados obtidos em cálculo, recorreu-se à representação gráfica e à apresentação em quadros dos mesmos. As figuras ajudam na interpretação e compreensão das conclusões do estudo apresentado, nomeadamente na identificação, de forma objectiva, das causas de falha e equipamentos mais críticos.

São também calculados alguns indicadores considerados fundamentais para a Gestão da Manutenção, tais como, o tempo médio entre falhas, tempo médio de reparação e a disponibilidade média do sistema.

Ainda neste capítulo são apresentadas justificações para a ocorrência das falhas que mais contribuíram para a diminuição do tempo de operação/exploração do sistema e apresentadas soluções implementadas e propostas para condições de melhoria ao processo produtivo. Neste contexto, abordam-se também particularidades nas actuações de manutenção no CPL.

Foi determinante para a exequibilidade deste estudo baseado em conceitos de Disponibilidade e Fiabilidade, a clarificação do tipo de problema, dos objectivos, das condições de fronteira e das limitações do estudo em função da informação disponível.

## **5.2. Modelação da Taxa de Falhas do Sistema**

O conhecimento da tendência verificada nas taxas de ocorrência de falhas, permite adequar o tipo de modelo mais indicado para estimativa da Fiabilidade (Dias, 2002).

Neste número apresentar-se-á o estudo dos quatro períodos (intervalos de tempo) no que respeita à Taxa de Ocorrência de Falhas (ROCOF – *Rate of Occurrence of Failures*). Perante a ordem cronológica das falhas, registadas por período (anexo III), recorrer-se-á ao teste de Laplace de modo a identificar a presença de possíveis Processos de Poisson, recorrendo ainda à análise gráfica dos dados como complemento, permitindo visualizar o comportamento do sistema ao longo do tempo.

### 5.2.1. Período desde o início do estudo até à primeira Grande Reparação (Início até GR1)

Segundo Dias (2002), o teste de Laplace, baseado numa estatística amostral, permite verificar se a taxa de falhas é constante, ou se pelo contrário, apresenta alguma tendência.

O quadro 5.1 apresenta por ordem cronológica os tempos das ocorrências que se verificaram neste período. Na primeira coluna encontra-se a numeração das falhas ocorridas (ordem cronológica) e na segunda coluna fazem-se coincidir os somatórios das horas de funcionamento do sistema desde o início do período, ou seja, a idade do sistema no momento da falha.

**Quadro 5.1 – Horas acumuladas por falha ocorrida (Início até GR1)**

1	99,17
2	110,83
3	226,25
4	266,92
5	270,75
6	332,92
7	386,75
8	534,00
9	874,58
10	952,62
11	1177,42
12	1188,67
13	1340,50
14	1467,00
15	1640,00
16	1679,42
17	1803,50
18	1862,17
19	2145,50
20	2187,75
21	2218,25
22	2250,00
23	2413,83
24	2422,92

Na figura 5.1, representam-se graficamente os valores apresentados no quadro 5.1, colocando no eixo das ordenadas, os números das ocorrências e no eixo das abcissas, os tempos acumulados das respectivas falhas. A análise gráfica do número de falhas em função do tempo de vida do sistema permite avaliar, de uma forma grosseira, o comportamento do sistema. Se for possível ajustar uma recta ao conjunto de pontos então, a tendência será para um Processo de Poisson Homogéneo.

Da análise do gráfico na figura 5.1, poder-se-á estimar que a taxa de falhas é constante, uma vez que é possível ajustar, embora com alguma inexactidão, uma recta ao conjunto de pontos, logo o sistema segue um Processo de Poisson Homogéneo.

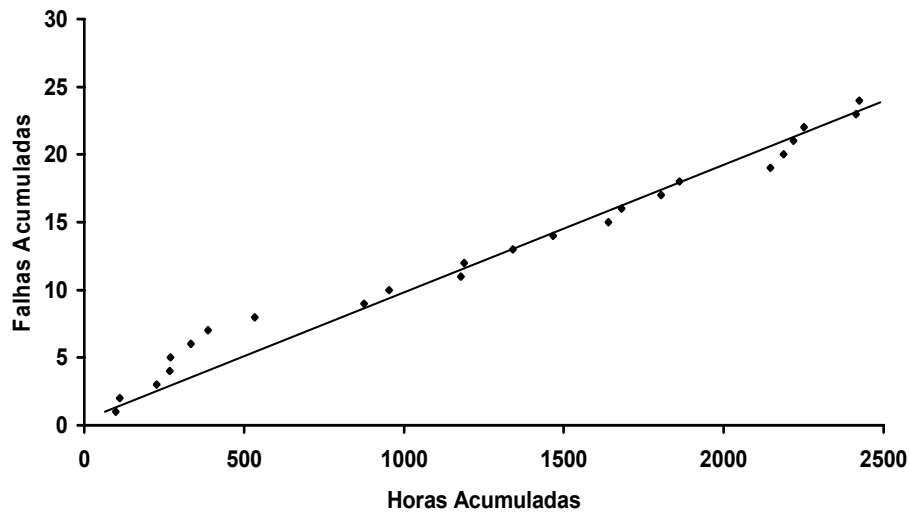


Figura 5.1 – Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (Início até GR1)

Por forma a provar a estimativa feita a partir da leitura e análise do gráfico da figura 5.1, poder-se-á aplicar o teste de Laplace ao sistema. A aplicação deste teste limitado por tempo, de acordo com a expressão 3.7 apresentada no capítulo 3 deste trabalho, para as 23 falhas registadas para um período com uma duração de 2422,92 horas será:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] = \left( \sqrt{12 \cdot 23} \right) \cdot \left[ \frac{29851,7}{23 \cdot 2422,92} - 0,5 \right] = 0,5927$$

Se for considerado um nível de significância  $\alpha = 0,10$ , tradicionalmente mais utilizado, vem:  $Z_{\alpha/2} = Z_{0,05} = 1,645$  (Valor retirado da tabela, anexo IV).

Como  $|Z_0| < Z_{\alpha/2}$ , logo, aceita-se  $H_0$ , podendo deste modo confirmar-se a análise gráfica anterior. Está-se perante um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) com



uma taxa de falhas constante. O valor de  $Z_0$  é positivo, o que prenuncia a tendência para um ligeiro crescimento da taxa de falhas.

O quadro 5.2 mostra para este período de estudo, o número de ocorrências de falha por tipo de causa, denominadas por frequência absoluta. O quadro contempla ainda valores da frequência relativa e frequência relativa acumulada para a construção do diagrama da figura 5.2.

**Quadro 5.2 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (Início até GR1)**

Código	Tipo de Causa	Frequência Absoluta	Frequência Relativa	Frequência Relativa Acumulada
F20	Arrefecedor	5	0,217	0,217
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	5	0,217	0,435
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	4	0,174	0,609
F15	Doseadores e Pesadores	2	0,087	0,696
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	1	0,043	0,739
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	1	0,043	0,783
F09	Electrofiltro, Despoeiramento	1	0,043	0,826
F13	Elevadores	1	0,043	0,870
F19	Forno	1	0,043	0,913
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	1	0,043	0,957
F27	Refractário	1	0,043	1,000
-	<b>Total</b>	23	1,000	-

A interpretação dos valores do quadro 5.2, revela serem as causas F20 (Arrefecedor) e F26 (Encravamento de Ciclones) aquelas que apresentam maior incidência, sendo responsáveis por mais de 40% das falhas.

O diagrama de Pareto apresentado na figura 5.2 mostra graficamente os valores do quadro 5.2, para uma melhor interpretação do cenário do período de estudo.

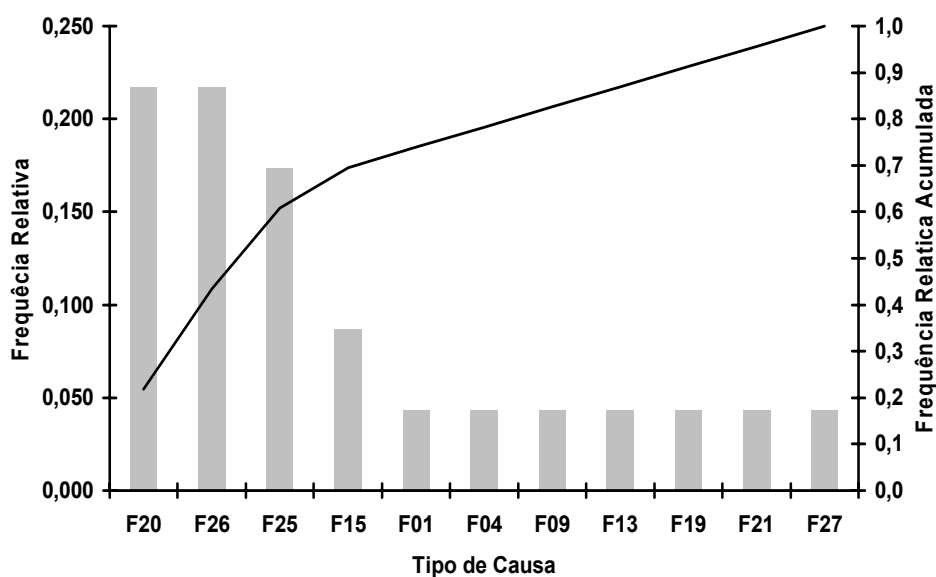


Figura 5.2 – Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (Início até GR1)

Poder-se-á também contrastar os valores anteriores com o total de horas por causa de falha. No quadro 5.3 é apresentado o somatório de horas com que cada causa de falha contribuiu para a diminuição do tempo de operação do sistema neste períodos de estudo.

Quadro 5.3 – Tempo de reparação por tipo de causa (Início até GR1)

Código	Tipo de Causa	Número de Ocorrências	Tempo de Reparação (Horas)
F20	Arrefecedor	5	98,00
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	4	83,92
F27	Refractário	1	56,00
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	5	29,50
F15	Doseadores e Pesadores	2	16,25
F19	Forno	1	9,88
F09	Electrofiltro, Despoeiramento	1	8,17
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	1	1,42
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	1	1,00
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	1	0,83
F13	Elevadores	1	0,25
-	<b>Total</b>	23	305,22

Neste período, a causa de falha F20 (Arrefecedor) foi a que teve maior tempo de reparação acumulado, para além de ter sido um dos tipos de causa com maior número de ocorrências. No entanto, ocorreram falhas com outros tipos de causa que

também contribuíram significativamente para a diminuição do tempo de operação do sistema neste período, sem se ter verificado um elevado número de ocorrências das mesmas. Note-se o exemplo da causa F27 (Refractário) que com apenas uma única ocorrência, contribuiu para a diminuição do tempo de operação do sistema, com um período de reparação superior a 50 horas.

### 5.2.2. Período desde a primeira à segunda Grande Reparação (GR1 até GR2)

O quadro 5.4 apresenta por ordem cronológica os tempos das ocorrências que se verificaram neste período, fazendo-se coincidir os somatórios das horas de funcionamento do sistema desde o início do período, ou seja a idade do sistema no momento da falha.

Quadro 5.4 – Horas acumuladas por falha ocorrida (GR1 até GR2)

1	1,75
2	6,50
3	28,83
4	31,33
5	99,00
6	151,17
7	233,42
8	326,00
9	351,58
10	381,00
11	384,67
12	517,50
13	522,42
14	642,67
15	738,83
16	776,00
17	835,08
18	914,92
19	976,50
20	1125,00
21	1330,25
22	1399,25
23	1491,42
24	1512,58
25	1874,92

26	1880,00
27	2003,83
28	2017,42
29	2051,42
30	2108,75
31	2213,17
32	2389,12
33	2507,08
34	2576,92
35	2604,83
36	2609,83
37	2646,83
38	2754,92
39	2773,75
40	2810,25
41	3074,25
42	3092,42
43	3511,83
44	3600,92
45	3692,92
46	3831,25
47	3991,83
48	3992,08
49	4133,17
50	4183,75

51	4301,50
52	4353,83
53	4382,42
54	4513,75
55	4537,25
56	5176,17
57	5200,17
58	5238,00
59	5420,33
60	5832,75
61	5877,50
62	6089,50
63	6133,00
64	6645,50
65	6714,75
66	6803,33
67	7074,58
68	7078,58
69	7121,33
70	7172,08
71	7205,58
72	7279,50
73	7280,00
74	7295,17
75	7297,83

76	7375,67
77	7384,75
78	7387,33
79	7437,50
80	7492,25
81	7547,58
82	7605,33
83	7605,63
84	7764,00
85	7788,08
86	7790,58
87	7989,58
88	8107,83
89	8275,75
90	8297,50
91	8324,17
92	8486,67

Na figura 5.3, representam-se graficamente os valores apresentados no quadro 5.4, tal como no número anterior. Da análise gráfica do número de falhas em função do tempo de vida do sistema (figura 5.3), poder-se-á estimar que a taxa de falhas é também constante. Uma vez que é possível ajustar, embora com alguma

inexactidão, uma recta ao conjunto de pontos, o sistema segue um Processo de Poisson Homogéneo.

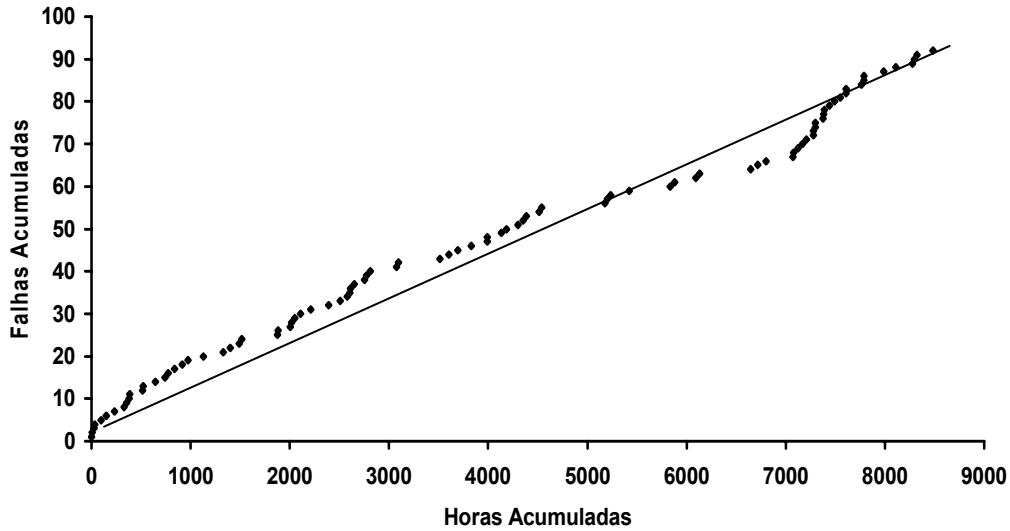


Figura 5.3 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (GR1 até GR2)

Comprovando a estimativa feita a partir da leitura e análise do gráfico da figura 5.3, aplicando o teste de Laplace ao sistema para as 91 falhas registadas num período com uma duração de 8486,67 horas será:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] = \left( \sqrt{12 \cdot 91} \right) \cdot \left[ \frac{374389,75}{91 \cdot 8486,67} - 0,5 \right] = -0,5029$$

Se for considerado um nível de significância  $\alpha = 0,10$ , tradicionalmente mais utilizado, vem:  $Z_{\alpha/2} = Z_{0,05} = 1,645$  (Valor retirado da tabela, anexo IV).

Como  $|Z_0| < Z_{\alpha/2}$ , logo, aceita-se  $H_0$ , podendo deste modo confirmar-se a análise gráfica anterior. Está-se perante um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) com uma taxa de falhas constante. O facto do valor de  $Z_0$  ser negativo, prenuncia a tendência da taxa de falhas para um ligeiro decrescimento.

No entanto, a representação gráfica do número acumulado de falhas em função do tempo de vida no momento da falha na figura 5.3, permite também observar que o

comportamento do sistema ao longo do tempo teve algumas variações. Pois a taxa de falhas parece decrescer ligeiramente até cerca das 1800 horas, entre as 1800 e as 5000 parece constante, embora evidencie um decréscimo até cerca das 7000 horas, momento a partir do qual apresenta um comportamento crescente até final do período. Representando graficamente este comportamento em 3 períodos (figuras 5.4, 5.5 e 5.6), poder-se-á comprovar o descrito anteriormente. O facto do teste de Laplace ter apresentado um resultado prenunciando uma taxa de falhas constante, deve-se a que o posicionamento dos pontos (falhas ocorridas) acompanha a recta traçada sem grandes afastamentos.

Na figura 5.4 representa-se graficamente a ocorrência de falhas ao longo do tempo, para um primeiro período, onde a taxa de falhas parece decrescer.

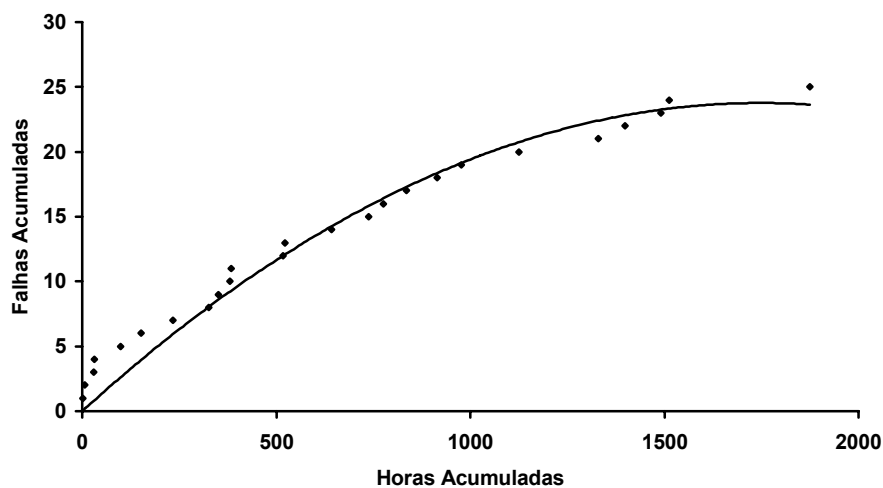


Figura 5.4 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (1º período de GR1/GR2)

Aplicando o teste de Laplace, de modo a comprovar-se a análise da figura 5.4 para as 25 falhas registadas num período com uma duração de 1874,92 horas, onde:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] = \left( \sqrt{12 \cdot 25} \right) \cdot \left[ \frac{16652,58}{25 \cdot 1874,92} - 0,5 \right] = -2,5068$$

Se for considerado um nível de significância  $\alpha = 0,10$ , vem:  $Z_{\alpha/2} = 1,645$

Rejeita-se  $H_0$ , uma vez que  $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ . Está-se perante um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH). Como  $Z_0$  é negativo, confirma-se a análise gráfica anterior, a taxa de falhas é francamente decrescente para este primeiro período.

Na figura 5.5 representa-se graficamente a ocorrência de falhas ao longo do tempo, para um segundo período, onde a taxa de falhas ainda parece decrescer ligeiramente, pois verifica-se a tendência das falhas a acompanharem uma curva ligeiramente decrescente.

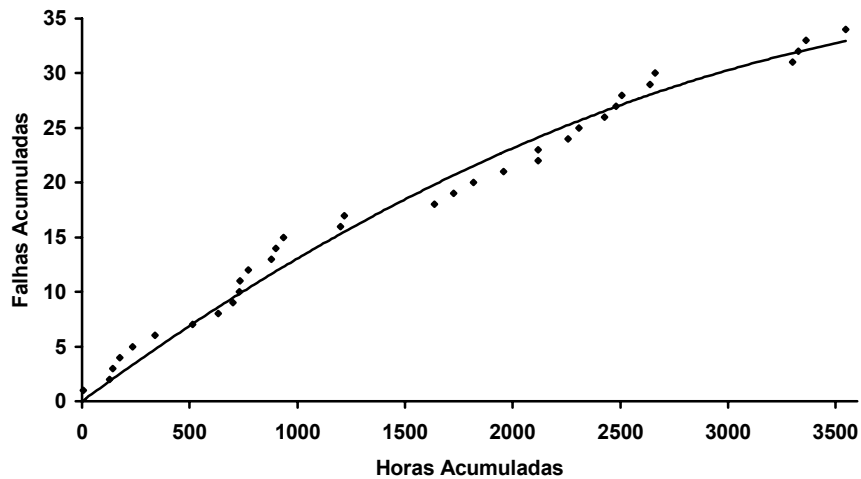


Figura 5.5 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (2º período de GR1/GR2)

Aplicando o teste de Laplace, para as 34 falhas registadas no segundo período com uma duração de 3545,42 horas, onde:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] = \left( \sqrt{12 \cdot 34} \right) \cdot \left[ \frac{52428,78}{34 \cdot 3545,42} - 0,5 \right] = -1,3143$$

Se for considerado um nível de significância  $\alpha = 0,10$ , vem:  $Z_{\alpha/2} = 1,645$

Como  $|Z_0| < Z_{\alpha/2}$ , logo, aceita-se  $H_0$ . Está-se perante um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) com uma taxa de falhas constante para este segundo período. No entanto, o valor de  $Z_0$  é negativo e bastante próximo de 1,645, o que prenuncia a tendência da taxa de falhas para decrescer. Confirma-se assim a análise gráfica anterior.

Na figura 5.6 representa-se graficamente a ocorrência de falhas ao longo do tempo, para um terceiro período, onde a taxa de falhas parece crescer. A tendência das falhas parece acompanhar uma curva crescente.

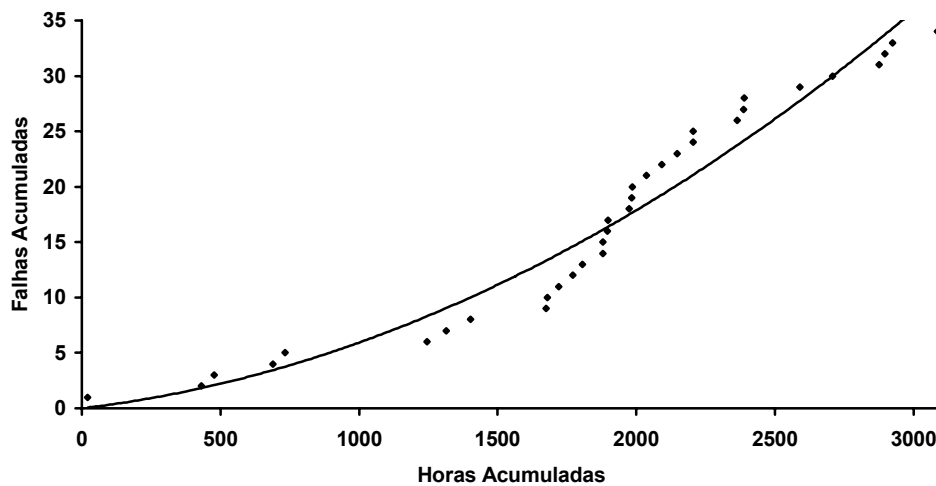


Figura 5.6 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (3º período de GR1/GR2)

Aplicando o teste de Laplace, comprova-se a análise do gráfico da figura 5.6 para as 33 falhas registadas no terceiro período com uma duração de 3066,34 horas, onde:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] = \left( \sqrt{12 \cdot 33} \right) \cdot \left[ \frac{62690,33}{33 \cdot 3066,34} - 0,5 \right] = 2,3787$$

Se for considerado um nível de significância  $\alpha = 0,10$ , vem:  $Z_{\alpha/2} = 1,645$

Rejeita-se  $H_0$ , uma vez que  $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ . Está-se perante um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH). Como  $Z_0$  é positivo, confirma-se a análise gráfica anterior, a taxa de falhas é francamente crescente para este terceiro período.

Pela análise dos gráficos e dos resultados do teste de Laplace para o estudo da tendência da taxa de falhas para os 3 períodos, podem-se retirar algumas conclusões interessantes. Confirma-se o típico comportamento da taxa de falhas de sistemas reparáveis, isto é, neste período o sistema seguiu uma trajectória que se assemelha à da vulgarmente conhecida por “curva da banheira”. Pela leitura dos gráficos podem ser identificadas as 3 zonas distintas da chamada curva da banheira, padronizada e característica do comportamento típico de sistemas reparáveis.

Num primeiro período, o arranque, normalmente denominado por período de “infância” dos equipamentos, com uma taxa de falhas francamente decrescente revela uma melhoria do sistema em termos de disponibilidade.

Num segundo período, o chamado período de “vida útil” ou de “maturidade” do equipamento, a disponibilidade mantém-se e tende mesmo a aumentar ligeiramente, fruto do comportamento mais estável do sistema devido também à manutenção assegurada. Pela análise gráfica deste período, verifica-se a tendência das falhas a acompanharem uma curva ligeiramente decrescente. Embora o teste de Laplace indique uma taxa constante, o valor negativo de -1,3 prenuncia uma tendência para a continuidade da taxa decrescente.

Por último, a terceira fase, em que o sistema apresenta uma taxa de falhas francamente crescente (teste estatístico), a sua disponibilidade e a Fiabilidade decrescem, renunciando a necessidade para uma Grande Reparação. Esta última fase é caracterizada pela degradação avançada do sistema, uma vez que tratando-se de sistemas reparáveis, requerem uma manutenção mais intensiva e cuidada que lhes reponha as das condições ideais/iniciais de funcionamento. Esta fase é habitualmente denominada por período de “envelhecimento”.

Segundo Assis (1997), há interesse em conhecer o momento em que este período tem o seu início. Por um lado, para poder ser evitado, ou pelo menos adiado, através



do estabelecimento de acções de manutenção preventiva. Por outro lado, para que se possam realizar missões seguras sem a ocorrência de falhas imprevistas, actuando preventivamente.

Ao conhecer o momento em que o sistema tende a “envelhecer”, poder-se-á planear e realizar devidamente as acções de manutenção dos equipamentos e sistemas, de modo a assegurar a continuidade do processo produtivo.

O crescimento da taxa de falhas do sistema de cozedura do cimento, para este período, só se acentuou a partir das 7000 horas. Poder-se-á dizer que foi a partir deste momento que o sistema começou a apresentar evidências de degradação e entrou no seu período de desgaste ou envelhecimento. Isto é, aproximadamente 1500 horas, antes do final do período.

No quadro 5.5 são apresentados os valores correspondentes à frequência absoluta, frequência relativa e frequência relativa acumulada para a construção do diagrama da figura 5.7.

**Quadro 5.5 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (GR1 até GR2)**

Código	Tipo de Causa	Frequência Absoluta	Frequência Relativa	Frequência Relativa Acumulada
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	15	0,165	0,165
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	11	0,121	0,286
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	10	0,110	0,396
F05	Tensão de Comando e Instrumentação	8	0,088	0,484
F20	Arrefecedor	7	0,077	0,560
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	7	0,077	0,637
F27	Refractário	7	0,077	0,714
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	5	0,055	0,769
F24	Disparo do Motor Principal	5	0,055	0,824
F15	Doseadores e Pesadores	4	0,044	0,868
F19	Forno	4	0,044	0,912
F09	Electrofiltro, Despoeiramento	2	0,022	0,934
F22	Lubrificação	2	0,022	0,956
F03	Falta de Ar	1	0,011	0,967
F07	Moagem de Combustível Sólido	1	0,011	0,978
F13	Elevadores	1	0,011	0,989
F18	Moinho/Separador	1	0,011	1,000
-	<b>Total</b>	91	1,000	-

A interpretação dos valores do quadro 5.5, revela serem as causas F26 (Encravamento de Ciclones), F21 (Ventilador de Tiragem do Processo) e F01 (Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica) aquelas que apresentaram maior incidência, sendo responsáveis por cerca de 40% das falhas.

O diagrama de Pareto apresentado na figura 5.7 mostra graficamente os valores do quadro 5.5, para uma melhor interpretação do cenário do período de estudo.

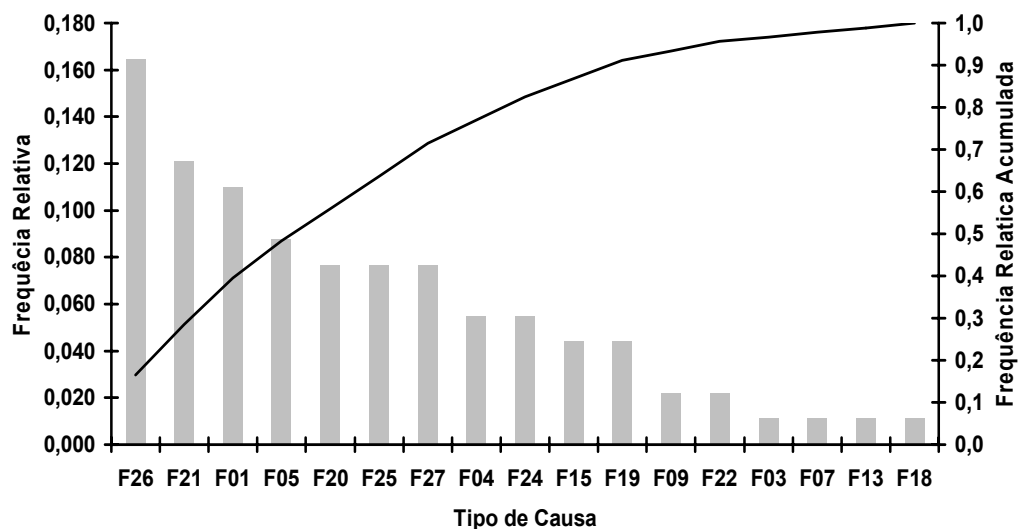


Figura 5.7 – Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (GR1 até GR2)

Poder-se-á também contrastar os valores anteriores com o total de horas por causa de falha. No quadro 5.6 apresenta-se o somatório de horas com que cada causa de falha contribuiu para a diminuição do tempo de operação do sistema neste períodos de estudo.

Quadro 5.6 – Tempo de reparação por tipo de causa (GR1 até GR2)

Código	Tipo de Causa	Número de Ocorrências	Horas de Reparação
F27	Refractário	7	183,92
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	15	139,20
F20	Arrefecedor	7	105,50
F24	Disparo do Motor Principal	5	79,00
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	11	61,83
F09	Electrofiltro, Despoeiramento	2	59,33
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	10	44,50
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	7	40,67
F05	Tensão de Comando e Instrumentação	8	27,22
F19	Forno	4	24,00
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	5	20,17
F15	Doseadores e Pesadores	4	7,17
F22	Lubrificação	2	5,00
F18	Moinho/Separador	1	4,50
F13	Elevadores	1	3,42
F07	Moagem de Combustível Sólido	1	3,25
F03	Falta de Ar	1	0,33
	<b>Total</b>	91	809,00

A causa F26 (Encravamento de Ciclones) ocorreu com maior frequência neste período, no entanto o somatório dos seus tempos de reparação não são os mais elevados. Mais uma vez a causa F27 (Refractário) contribui significativamente para a diminuição do tempo de operação do sistema.

### 5.2.3. Período desde a segunda à terceira Grande Reparação (GR2 até GR3)

O quadro 5.7 apresenta por ordem cronológica os tempos das ocorrências que se verificaram neste período, fazendo-se coincidir os somatórios das horas de funcionamento do sistema desde o início do período, ou seja a idade do sistema no momento da falha.

Quadro 5.7 – Horas acumuladas por falha ocorrida (GR2 até GR3)

1	23,75
2	26,17
3	29,92
4	32,25
5	38,00
6	164,17
7	197,00
8	207,33
9	382,42
10	414,42
11	536,83
12	616,92
13	706,00
14	775,42
15	1019,00
16	1078,33
17	1093,42
18	1105,88
19	1214,92
20	1241,50
21	1258,00
22	1347,83
23	1349,35
24	1364,83
25	1371,83

26	1487,45
27	1544,42
28	1639,33
29	1744,75
30	1754,92
31	1813,33
32	1963,25
33	1975,50
34	2038,00
35	2125,67
36	2138,25
37	2198,83
38	2209,42
39	2250,00
40	2309,75
41	2310,25
42	2361,50
43	2384,25
44	2390,50
45	2393,25
46	2543,00
47	2546,33
48	2608,58
49	2673,17
50	2690,25

51	2691,17
52	2713,58
53	2716,17
54	2717,33
55	3116,25
56	3184,00
57	3345,92
58	3651,75
59	3784,33
60	3853,42
61	4162,50
62	4333,83
63	4367,92
64	4370,67
65	4403,75
66	4625,12
67	4708,50
68	4791,63
69	4802,75
70	4944,67
71	4948,50
72	4952,58
73	5147,58
74	5191,75
75	5276,58

76	5287,33
77	5458,58
78	5489,67
79	5589,83
80	5612,42
81	5748,92
82	5793,50
83	5810,92
84	5874,50
85	6080,92
86	6372,07
87	6373,17
88	6397,55
89	6679,58
90	6682,00
91	6740,75
92	6779,43
93	6954,00
94	7103,50
95	7144,92
96	7167,08
97	7217,33
98	7510,67
99	7539,17
100	7788,33

101	8064,08
102	8074,67
103	8082,33
104	8132,92
105	8165,33

Na figura 5.8, encontram-se representados graficamente os valores apresentados no quadro 5.7, para avaliar o comportamento do sistema neste período. No eixo das ordenadas, é representado o número de ocorrências (falhas) e no eixo das abcissas, os tempos acumulados das respectivas falhas, isto é, o tempo de vida do sistema.

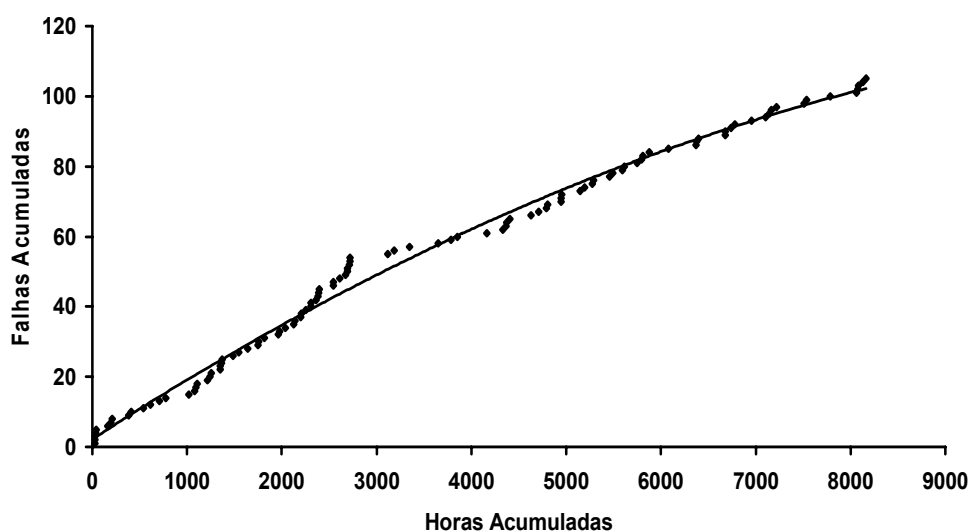


Figura 5.8 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (GR2 até GR3)

Após a análise da figura 5.8, verifica-se a tendência das falhas para acompanharem uma curva ligeiramente decrescente. Assim, uma vez que não é possível ajustar

uma recta ao conjunto dos pontos, a tendência será para um Processo de Poisson Não Homogéneo e poder-se-á estimar que a taxa de falhas é decrescente.

Comprovando a estimativa feita pela análise gráfica (figura 5.8), com a aplicação do teste de Laplace ao sistema para as 104 falhas registadas com uma duração de 8165,33 horas será:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] = \left( \sqrt{12 \cdot 104} \right) \cdot \left[ \frac{376207,15}{104 \cdot 8165,33} - 0,5 \right] = -2,013$$

Se for considerado um nível de significância  $\alpha = 0,10$ , tradicionalmente mais utilizado, vem:  $Z_{\alpha/2} = Z_{0,05} = 1,645$  (Valor retirado da tabela, anexo IV).

Como  $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ , logo, rejeita-se  $H_0$ , podendo deste modo confirmar-se a análise gráfica anterior. Está-se perante um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH) com uma taxa de falhas decrescente, uma vez que o valor de  $Z_0$  é negativo.

Analisando novamente a figura 5.8, pode-se notar que o espaçamento entre falhas, isto é, o tempo de bom funcionamento entre ocorrências de falhas, é superior na parte final do período. Ou seja, o tempo médio entre falhas melhora para as observações mais recentes deste período. Esta afirmação ir-se-á comprovar no número 5.3.2 deste capítulo.

Uma das razões técnicas possíveis para a presença de uma taxa de falhas decrescente está relacionada com a causa de falha F26 (Encravamentos de Ciclones). Este tipo de causa de falha é o mais frequente para as observações mais recentes deste período, cujo tempo médio entre ocorrências parece ser superior relativamente ao início do período.

No quadro 5.8 são apresentados os valores correspondentes à frequência absoluta, frequência relativa e frequência relativa acumulada para a construção do diagrama da figura 5.9.

Quadro 5.8 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (GR2 até GR3)

Código	Tipo de Causa	Frequência Absoluta	Frequência Relativa	Frequência Relativa Acumulada
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	42	0,404	0,404
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	9	0,087	0,490
F19	Forno	9	0,087	0,577
F20	Arrefecedor	8	0,077	0,654
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	7	0,067	0,721
F08	Filtro de Mangas de Processo, Despoeiramento	5	0,048	0,769
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	4	0,038	0,808
F15	Doseadores e Pesadores	4	0,038	0,846
F07	Moagem de Combustível Sólido	3	0,029	0,875
F22	Lubrificação	3	0,029	0,904
F27	Refractário	3	0,029	0,933
F13	Elevadores	2	0,019	0,952
F14	Caleira Porosa (Ventilador/Filtro)	2	0,019	0,971
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	2	0,019	0,990
F05	Tensão de Comando e Instrumentação	1	0,010	1,000
-	<b>Total</b>	104	1,000	-

A interpretação dos valores do quadro 5.8, revela ser a causa F26 (Encravamento de Ciclones), a causa com maior incidência, responsáveis por cerca de 40% das falhas.

O diagrama de Pareto apresentado na figura 5.9 mostra graficamente os valores do quadro 5.8, ajudando na interpretação do cenário do período de estudo.

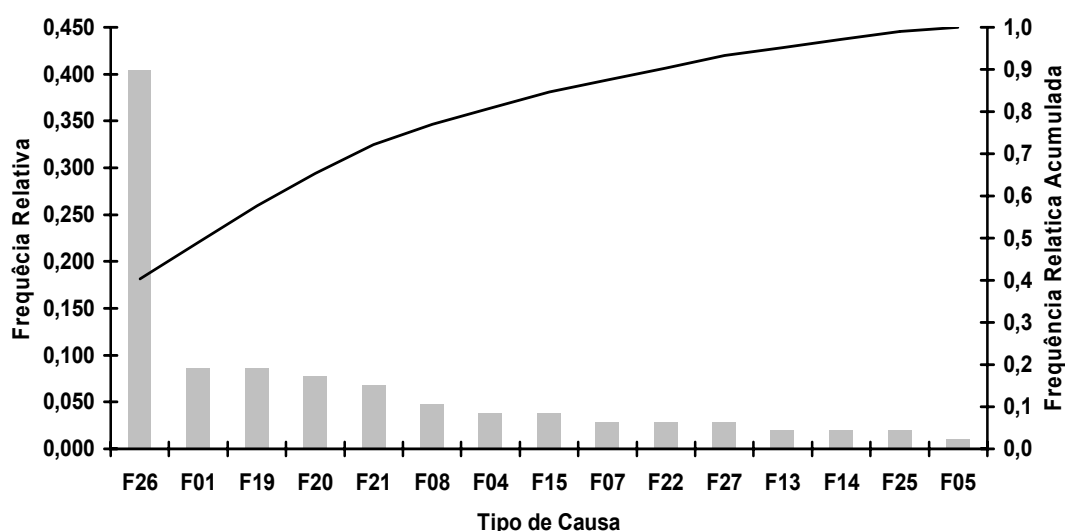


Figura 5.9 – Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (GR2 até GR3)

Poder-se-á também contrastar os valores anteriores com o total de horas por causa de falha. No quadro 5.9 apresenta-se o somatório de horas com que cada causa de falha contribuiu para a diminuição do tempo de operação do sistema neste períodos de estudo.

**Quadro 5.9 – Tempo de reparação por tipo de causa (GR2 até GR3)**

Código	Tipo de Causa	Número de Ocorrências	Horas de Reparação
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	42	406,53
F19	Forno	9	153,12
F20	Arrefecedor	8	84,67
F27	Refractário	3	75,92
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	7	47,42
F15	Doseadores e Pesadores	4	19,67
F08	Filtro de Mangas de Processo, Despoeiramento	5	17,83
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	9	11,53
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	4	10,37
F07	Moagem de Combustível Sólido	3	6,67
F22	Lubrificação	3	6,62
F05	Tensão de Comando e Instrumentação	1	5,12
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	2	3,25
F13	Elevadores	2	1,08
F14	Caleira Porosa	2	0,92
-	<b>Total</b>	104	850,70

A causa F26 (Encravamento de Ciclones) ocorreu com maior frequência neste período, sendo também notório o elevado somatório dos seus tempos de reparação, quase 50% das horas totais de reparação. Também a causa F19 (Forno) contribui significativamente para a diminuição do tempo de operação do sistema neste período.

#### **5.2.4. Período desde a terceira Grande Reparação até ao fim do estudo (GR3 até Fim)**

O quadro 5.10 apresenta por ordem cronológica os tempos das ocorrências que se verificaram neste período, fazendo-se coincidir os somatórios das horas de

funcionamento do sistema desde o início do período, ou seja a idade do sistema no momento da falha.

**Quadro 5.10 – Horas acumuladas por falha ocorrida (GR3 até Fim)**

1	277,25
2	283,67
3	293,58
4	736,25
5	946,58
6	963,50
7	990,58
8	1048,00
9	1049,50
10	1065,42
11	1141,67
12	1298,17
13	1303,92
14	1472,08
15	1509,25
16	1514,50
17	1525,67
18	1539,50
19	1776,33
20	1799,33
21	1963,08
22	2007,17
23	2010,50
24	2030,37
25	2034,92

26	2167,52
27	2278,50
28	2499,22
29	2577,58
30	2601,68
31	2665,75
32	2667,33
33	2680,42
34	2822,58
35	2855,25
36	2876,75
37	2900,25
38	2906,37
39	3073,87
40	3301,92
41	3341,75
42	3425,08
43	3504,33
44	3519,83
45	3521,37
46	3573,85
47	3583,33
48	3601,33
49	3747,33
50	3837,08

51	3839,08
52	3949,58
53	3964,33
54	3964,63
55	4140,25
56	4196,00
57	4224,98
58	4289,35
59	4499,50
60	4523,58
61	4533,08
62	4535,00
63	4555,08
64	4574,50
65	4693,13
66	4807,50
67	4813,17
68	4838,08
69	4847,50
70	4887,08
71	4892,58
72	4899,67
73	4925,77
74	4960,67
75	5014,17

76	5014,50
77	5032,50
78	5062,50
79	5148,08

Na figura 5.10, representam-se graficamente os valores apresentados no quadro 5.10, para avaliar o comportamento do sistema neste período. No eixo das ordenadas, é representado o número de ocorrências (falhas) e no eixo das abcissas, os tempos acumulados das respectivas falhas, isto é, o tempo de vida do sistema.

Ao contrário do que se verificou no período anterior, para o período da GR3 até Fim, a análise gráfica (figura 5.10) prenuncia uma taxa de falhas crescente, pois verifica-se a tendência das falhas a acompanharem uma curva ligeiramente crescente. Uma vez que não é possível ajustar uma recta ao conjunto dos pontos, a tendência será para um Processo de Poisson Não Homogéneo.



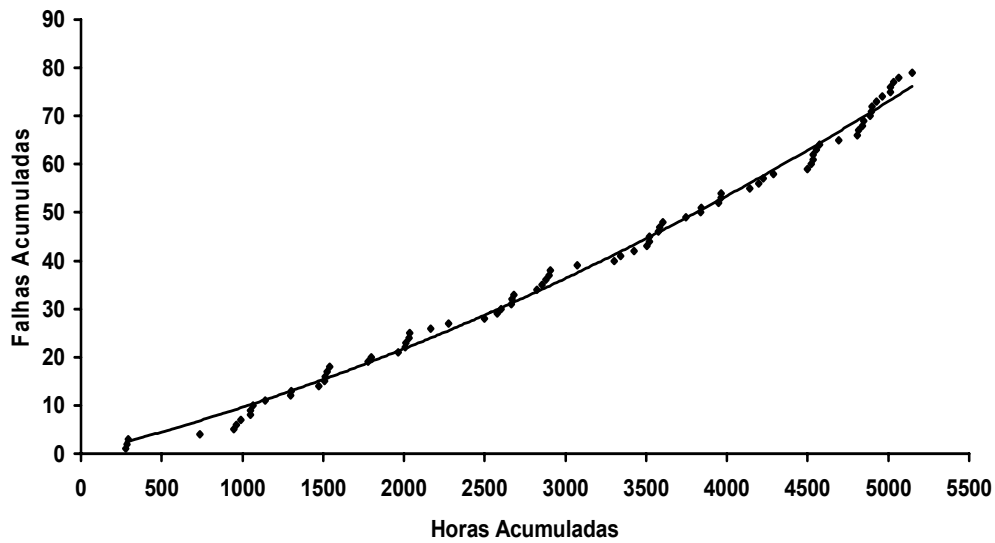


Figura 5.10 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema (GR3 até Fim)

Comprovando a estimativa feita a partir da leitura e análise gráfica da figura 5.10, pela aplicação do teste de Laplace ao sistema para as 78 falhas registadas com uma duração de 5148,08 horas será:

$$Z_0 = \left( \sqrt{12 \cdot n_f} \right) \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n_f \cdot T_0} - 0,5 \right] = \left( \sqrt{12 \cdot 78} \right) \cdot \left[ \frac{242736,93}{78 \cdot 5148,08} - 0,5 \right] = 3,197$$

Se for considerado um nível de significância  $\alpha = 0,10$ , tradicionalmente mais utilizado, vem:  $Z_{\alpha/2} = Z_{0,05} = 1,645$  (Valor retirado da tabela, anexo IV).

Como  $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ , logo, rejeita-se  $H_0$ , podendo deste modo confirmar-se a análise gráfica anterior. Está-se perante um Processo de Poisson Não Homogéneo (PPNH) com uma taxa de falhas francamente crescente, uma vez que o valor de  $Z_0$  é positivo.

Ao analisar novamente a figura 5.10, pode notar-se de imediato uma situação contrária relativamente ao período anterior. O espaçamento dos pontos (falhas), isto é, o tempo de bom funcionamento entre ocorrências de falhas, é superior no início do período. Ou seja, o tempo médio entre falhas é bastante inferior para as

observações mais recentes relativamente ao início do período. Esta afirmação ir-se-á comprovar no número 5.3.3 deste capítulo.

Mais uma vez, as razões técnicas possíveis para justificar o comportamento do sistema, relacionam-se com a causa de falha F26 (Encravamentos de Ciclones), embora neste período se esteja na presença de uma taxa de falhas crescente. Ao contrário do que se verificou no período anterior (GR2 até GR3), para este período, o tempo médio entre falhas para as observações mais recentes, com causa F26, parece ser inferior relativamente ao início do período.

No quadro 5.11 são apresentados os valores correspondentes à frequência absoluta, frequência relativa e frequência relativa acumulada para a construção do diagrama da figura 5.11.

**Quadro 5.11 – Número de ocorrências de falha por tipo de causa (GR3 até Fim)**

Código	Tipo de Causa	Frequência Absoluta	Frequência Relativa	Frequência Relativa Acumulada
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	29	0,372	0,372
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	20	0,256	0,628
F23	Sistema de Transmissão (Redutores, Roletes, ...)	7	0,090	0,718
F20	Arrefecedor	5	0,064	0,782
F19	Forno	3	0,038	0,821
F27	Refractário	3	0,038	0,859
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	2	0,026	0,885
F05	Tensão de Comando e Instrumentação	2	0,026	0,910
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	2	0,026	0,936
F24	Disparo do Motor Principal	2	0,026	0,962
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	2	0,026	0,987
F13	Elevadores	1	0,013	1,000
-	<b>Total</b>	78	1,000	-

A interpretação dos valores do quadro 5.11, revela serem F26 (Encravamento de Ciclones) e F01 (Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica), as causas com maior incidência, responsáveis por cerca de 60% das falhas. É de referir que a causa de falha F01 ocorreu com maior incidência no início deste período. Já a causa de falha F26, ocorreu com maior incidência no final do período.

O diagrama de Pareto apresentado na figura 5.11 mostra graficamente os valores do quadro 5.11 ajudando na interpretação do cenário do período de estudo.

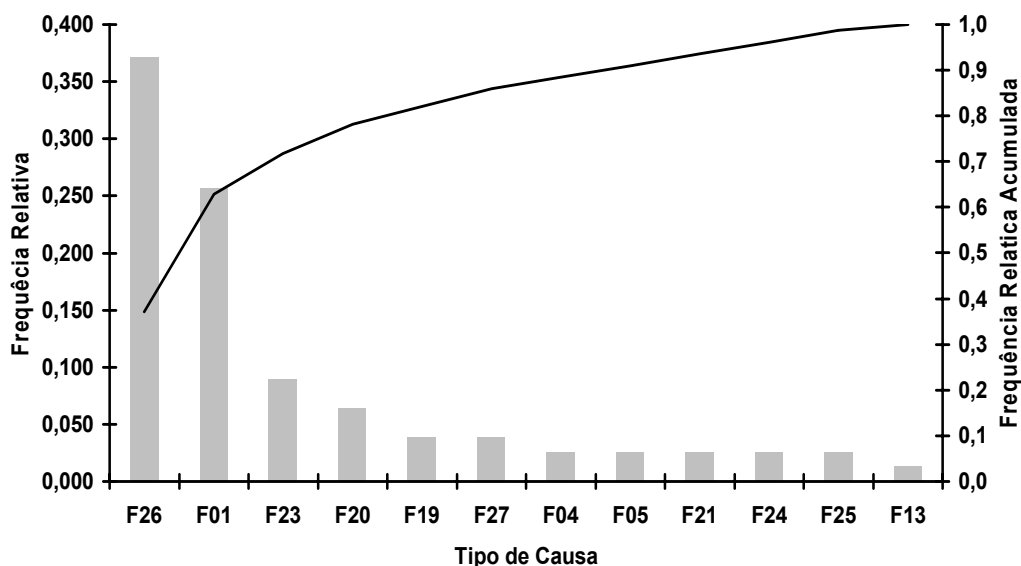


Figura 5.11 - Diagrama de Pareto dos tipos de causa das falhas ocorridas (GR3 até Fim)

Poder-se-á também contrastar os valores anteriores com o total de horas por causa de falha. No quadro 5.12 é apresentado o somatório de horas com que cada causa de falha contribuiu para a diminuição do tempo de operação do sistema neste períodos de estudo.

Quadro 5.12 – Tempo de reparação por tipo de Causa (GR3 até Fim)

Código	Tipo de Causa	Número de Ocorrências	Horas de Reparação
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos	29	260,37
F23	Sistemas de Transmissão	7	100,17
F20	Arrefecedor	5	75,45
F27	Refractário	3	59,98
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica	20	41,68
F24	Disparo do Motor Principal	2	22,83
F05	Tensão de Comando e Instrumentação	2	12,73
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação	2	10,17
F19	Forno	3	9,15
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica	2	5,58
F21	Ventilador de Tiragem do Processo	2	4,42
F13	Elevadores	1	1,58
-	<b>Total</b>	<b>78</b>	<b>604,12</b>

Também neste último período a causa F26 (Encravamento de Ciclones) ocorreu com maior frequência, sendo notório o elevado somatório dos seus tempos de reparação. Também a causa F23 (Sistemas de Transmissão) contribui significativamente para a diminuição do tempo de operação do sistema neste período.

### 5.2.5. Comparação dos resultados obtidos no estudo da tendência da taxa de falhas do sistema

Para uma melhor percepção dos resultados obtidos a partir dos cálculos efectuados nos números anteriores, o quadro 5.13 resume os valores dos 4 períodos estudados.

Quadro 5.13 – Variação da taxa de falhas nos vários períodos

Período de Estudo	Número de Horas	Número de Falhas	Teste de Laplace	Taxa de Falhas
Início - GR1	2422,92	23	0,5927	Constante
GR1 - GR2	8486,67	91	-0,5029	Constante
GR2 - GR3	8165,33	104	-2,013	Decrescente
GR3 - Fim	5148,08	78	3,197	Crescente

A leitura do quadro 5.13 permite fazer algumas análises relativamente ao comportamento do equipamento durante os períodos estudados, nomeadamente no que respeita à tendência da taxa de falhas, revelando o seu comportamento não aleatório perante alguma instabilidade na exploração.

Os dois primeiros períodos de estudo são caracterizados por uma taxa de falhas constante, revelando assim um comportamento sem alterações do ponto de vista de avarias inesperadas.

O período da GR2 até GR3 apresenta uma taxa de falhas decrescente embora se tenha verificado um elevado número de falhas. A presença de uma taxa de falhas variável e decrescente, significa que o sistema apresenta para o mesmo tempo desde a última falha, Fiabilidade diferente. Pode-se dizer que o sistema apresenta “Fiabilidade Crescente”, isto é, a Fiabilidade melhora ao longo do tempo. Ao analisar

do ponto vista da manutenção, pode-se concluir que as intervenções efectuadas após cada falha tenderam a melhorar a Fiabilidade do sistema.

Mais preocupante é o período da GR3 até Fim do estudo que apresenta uma taxa de falhas crescente. Logo esta análise pode traduzir-se numa manutenção deficiente neste período, tendência natural de decadência do equipamento ou alteração na operacionalidade do processo (excesso de carga, não cumprimento de limites, etc.).

É importante referir que a duração dos períodos de estudo considerados não é constante, nomeadamente o primeiro e o último. No primeiro, uma vez que se iniciou o estudo no início do ano civil, não coincidindo com o fim de uma Grande Reparação e o último período terminou não coincidindo com o início de uma Grande Reparação. Este facto leva a que o número de horas de funcionamento do sistema, nos vários períodos, não seja o mesmo, independentemente do número de horas de reparação a que tenha estado sujeito.

Também é importante referir o facto de ser a causa F26 (Encravamento de ciclones), a que apresentou maior número de ocorrências em todos os períodos estudados. Deste modo pode-se concluir ser F26 a principal causa a contribuir negativamente para a Fiabilidade do sistema.

### **5.3. Tempo Médio Entre Falhas e Tempo Médio de Reparação**

Após o estudo indispensável da ocorrência da taxa de falhas, isto é, a verificação da tendência da taxa de falhas a ocorrer segundo um Processo de Poisson Homogéneo (taxa de falhas constante) ou segundo um Processo de Poisson Não Homogéneo (taxa de falhas crescente ou decrescente), será importante quantificar o comportamento do sistema.

Poder-se-á complementar a análise do comportamento da Taxa de Ocorrência de Falhas (ROCOF – *Rate of Occurrence of Failures*) com o cálculo de alguns índices que melhor caracterizam a evolução do sistema nos vários períodos de estudo.

Nomeadamente, o cálculo de índices como o tempo médio entre falhas, taxa de falhas, tempo médio de reparação, taxa de reparação, disponibilidade e indisponibilidade. Índices estes, que fundamentam um estudo mais pormenorizado da Fiabilidade dos equipamentos e contribuem para a eficácia da Gestão da Manutenção do sistema.

### 5.3.1. Períodos com taxa de falhas constante: Início até GR2

Os sistemas reparáveis com taxas de falhas constantes comportam-se como um Processos de Poisson Homogéneos. É o caso do sistema nos dois primeiros períodos de estudo. A estimativa do tempo médio entre falhas (MTBF) pode ser obtida recorrendo às propriedades da distribuição Exponencial Negativa. Assim, de acordo com a expressão 3.1 apresentada no capítulo 3 deste trabalho, a estimativa do MTBF do sistema para os dois referidos períodos será:

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{2117,7}{23} = 92,074 \text{ horas} \quad (\text{Início até GR1})$$

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{7677,67}{91} = 84,370 \text{ horas} \quad (\text{GR1 até GR2})$$

Os valores do MTBF são consideravelmente diferentes entre os dois períodos com taxa de falhas constante. O facto do MTBF ser superior no primeiro período deve-se a que embora o somatório dos tempos entre falhas seja bastante superior no segundo período relativamente ao primeiro, o número de falhas no segundo período é proporcionalmente muito superior ao primeiro período.

Calculando a taxa de falhas de acordo com a expressão 3.19, vem:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{92,074} = 0,011 \quad (\text{Início até GR1})$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{84,37} = 0,012 \quad (\text{GR1 até GR2})$$

Na verdade o valor da taxa de falhas não permite evidenciar grandes diferenças na ocorrência de falhas entre os dois períodos de estudo. Conclui-se assim, que a taxa de falhas não é um revelador significativo do comportamento do sistema, para estes dois períodos, comparativamente com as conclusões tiradas a partir dos valores do MTBF.

Os valores médios dos tempos de reparação (MTTR) podem ser calculados, embora não se conheça a distribuição estatística que modela estes valores de tempo. Em termos práticos este valor pode servir como elemento comparativo com outros tempos de reparação referentes a outros períodos.

Poder-se-á também relacionar os valores do MTBF com os valores do MTTR dos mesmos períodos. De acordo a expressão 3.2.

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} = \frac{305,22}{23} = 13,27 \text{ horas (Início até GR1)}$$

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} = \frac{809}{91} = 8,89 \text{ horas (GR1 até GR2)}$$

Os resultados do MTTR são também bastante diferentes entre os dois períodos. No segundo período os tempos de reparação foram em média consideravelmente inferiores aos do primeiro período.

Após o cálculo do MTBF e do MTTR poder-se-á então calcular a disponibilidade média do sistema de acordo com a expressão 3.3.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{92,074}{92,074 + 13,270} = 0,874 \text{ (87,4\%)} \quad (\text{Início até GR1})$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{84,37}{84,37 + 8,89} = 0,905 \text{ (90,5\%)} \quad (\text{GR1 até GR2})$$

A disponibilidade revela a probabilidade da operacionalidade do sistema em determinado momento para cada período de estudo. O aumento de disponibilidade é o principal objectivo de qualquer modelo de manutenção a implementar ou melhorar.

Numa breve análise pode-se concluir que o facto de o primeiro período de estudo ter tido um MTBF superior ao segundo período, não impossibilitou da disponibilidade média do sistema ser superior no segundo período. Isto acontece porque o valor do MTTR no primeiro período é superior relativamente ao segundo período.

A indisponibilidade média, sendo outro indicador complementar da disponibilidade média, pode ser calculada de acordo com a expressão 3.4.

$$I = (1 - A) = (1 - 0,874) = 0,126 \quad (12,6\%) \quad (\text{Início até GR1})$$

$$I = (1 - A) = (1 - 0,905) = 0,095 \quad (9,5\%) \quad (\text{GR1 até GR2})$$

A indisponibilidade é uma característica dos sistemas reparáveis. Este indicador, deverá também ser tomado em consideração, uma vez que será a partir dele que se poderá contabilizar os tempos de inactividade do sistema, isto é, tempos de não produção.

Como forma de resumo, os valores do MTBF do sistema para os dois referidos períodos é apresentada no quadro 5.14 conjuntamente com todos os outros valores de interesse para o estudo.

Quadro 5.14 – MTBF e outros indicadores (Início até GR2)

Período de Estudo	MTBF	MTTR	$\lambda$	A	I
Início – GR1	92,074	13,270	0,011	0,874	0,126
GR1 – GR2	84,370	8,890	0,012	0,905	0,095

### 5.3.2. Período com taxa de falhas decrescente: GR2 até GR3

No caso do terceiro período de estudo (GR2 até GR3), o sistema apresenta uma taxa de falhas decrescente comportando-se como um Processo de Poisson Não Homogéneo, sendo a “Fiabilidade Crescente”. Neste caso a estimativa do MTBF para as falhas mais recentes pode ser calculada usando o modelo de Crow, a partir da expressão 3.10, obtendo os coeficientes  $\beta$  e  $\hat{\lambda}$  pelo método de máxima verosimilhança de acordo com as expressões 3.11 e 3.12.



Assim, para um período com a duração de 8165,33, onde ocorreram 104 falhas, tal como foi considerado o terceiro período de estudo do sistema (GR2 até GR3) ter-se-á:

$$\beta = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f} \ln \frac{T}{\tau_i}} = \frac{104}{\sum_{i=1}^{104} \ln \frac{8165,33}{\tau_i}} = \frac{104}{133,88} = 0,7768$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T^\beta} = \frac{104}{0,7768} = 0,0951$$

A estimativa da taxa de falhas será então:

$$\rho = \hat{\lambda} \cdot \beta \cdot \tau^{(\beta-1)} = 0,0951 \cdot 0,7768 \cdot 8165,33^{(0,7768-1)} = 0,009894$$

Logo, o valor estimado para o MTBF das falhas mais recentes será dado pela expressão 3.13, isto é, o valor inverso da taxa de falhas estimada:

$$\theta = \frac{1}{\hat{\lambda} \cdot \beta \cdot \tau^{(\beta-1)}} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,009894} = 101,07 \text{ horas}$$

Este modelo permite definir também intervalos de confiança para a estimativa calculada do MTBF. Deste modo, de acordo com as expressões 3.14 e 3.15, para o período de funcionamento em estudo, considerando o número de falhas ocorridas, para um nível de significância de 10% ( $\alpha = 0,1$ ) e retirando os coeficientes  $\pi_1$  e  $\pi_2$  das tabelas do anexo IV, ter-se-á:

$$\text{Limite inferior: } \theta_i = \theta \cdot \pi_1 = 101,07 \cdot 0,791 = 79,9484 \text{ horas}$$

$$\text{Limite superior: } \theta_s = \theta \cdot \pi_2 = 101,07 \cdot 1,286 = 129,9793 \text{ horas}$$

O intervalo de confiança definido após a estimação do MTBF, uma vez que se está perante uma taxa de falhas decrescente, significando que ao longo do período de estudo, os intervalos de tempo entre falhas tendem a aumentar, pode ser entendido como uma óptima ferramenta de reformulação do plano de manutenção do próximo período. Isto ao partir do pressuposto de que não se alteram as condições de funcionamento do sistema. Os valores estimados poderão ser usados na

optimização dos tempos de actuação das acções de manutenção, no sentido de minimizar as paragens do sistema para as referidas intervenções de manutenção. Deste modo contribuir-se-á, tanto para a minimização dos custos de manutenção como para a maximização da disponibilidade do sistema para o processo produtivo.

No entanto, para o estudo em causa, e uma vez que se está perante um sistema de complexidade considerável, é importante salientar que os resultados deste período deverão ser entendidos como reveladores de uma actuação correcta nas intervenções de manutenção. Por outro lado, também como reveladores da adequação correcta do sistema ao processo produtivo. Isto é, houve neste período um procedimento adequado a nível dos elementos necessários ao processo produtivo.

Poder-se-á também confrontar a ordem cronológica das falhas ocorridas com os valores estimados pelo modelo de Crow. Na figura 5.12, é representada a ordem cronológica das falhas ocorridas no período GR2 até GR3, bem como o número esperado de falhas, obtido pela expressão 3.9, segundo o modelo de Crow.

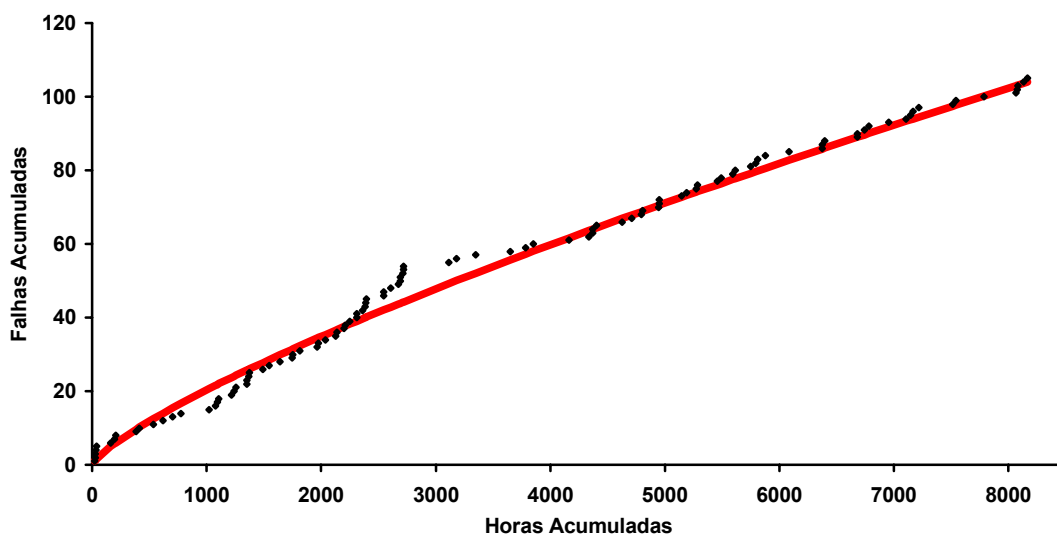


Figura 5.12 - Falhas acumuladas em função do tempo de vida do sistema e respectivo valor esperado ajustado pelo modelo de Crow (GR2 até GR3)

Como o sistema apresenta uma taxa de falhas decrescente para este período, significa que o tempo médio entre falhas melhora substancialmente para as

observações mais recentes. O valor do MTBF estimado para as falhas mais recentes deste período é relativamente superior ao valor do MTBF calculado para os períodos anteriores que denunciavam uma taxa de falhas constante. Poder-se-á demonstrar graficamente a evolução do valor esperado do MTBF para um período de vida do sistema, igual ao período da GR2 até GR3, que será sensivelmente a duração média dos períodos de funcionamento do sistema entre grandes reparações. A figura 5.13 representa essa evolução estimada a partir da expressão 3.13, já anteriormente utilizada. A análise do tipo de gráfico apresentado na figura 5.13 poderá constituir um importante indicador para a optimização do planeamento das acções de manutenção preventiva, uma vez que fornece uma previsão para ocorrência de falha.

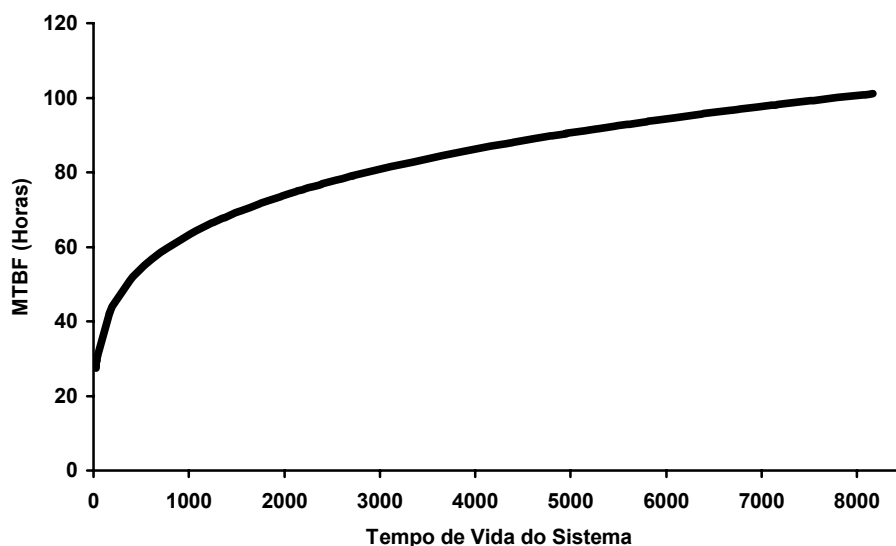


Figura 5.13 – Evolução do MTBF estimado para um período de vida do sistema

Tal como para o período anterior, embora não se conheça a distribuição estatística, o valor do MTTR para este período pode ser calculado de acordo a expressão 3.2.

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} = \frac{1576,8}{104} = 8,18 \quad \text{horas}$$

A disponibilidade média do sistema de acordo com a expressão 3.3.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{101,07}{101,07 + 8,18} = 0,925 \quad (92,5\%)$$

É necessário ter em atenção o facto de este índice de disponibilidade ter sido calculado a partir de um MTBF estimado para as falhas mais recentes e não do período inteiro. Logo, poder-se-á dizer que esta será a disponibilidade alcançada pelo sistema no momento. Cometer-se-á um erro ao comparar este índice com o dos períodos anteriores, se o objectivo for caracterizar todo o período de funcionamento.

Pode-se afirmar que, como estimativa optimista, o sistema poderá no próximo período de exploração, conseguir uma disponibilidade média de 92,5% se, se considerar que o MTBF se mantém constante e igual a 101 horas, para o mesmo MTTR.

A indisponibilidade média pode também ser calculada de acordo com a expressão 3.4.

$$I = (1 - A) = (1 - 0,925) = 0,0748 \quad (7,5\%)$$

A estimativa do MTBF do sistema para o período da GR2 à GR3 é apresentada no quadro 5.15 conjuntamente com todos os outros indicadores de interesse para o estudo.

Quadro 5.15 – MTBF e outros indicadores (GR2 até GR3)

Período de Estudo	MTBF Estimado	MTTR	$\lambda$	A	I
GR2 – GR3	101,07	8,18	0,0098	0,925	0,075

### 5.3.3. Período com taxa de falhas crescente: GR3 até Fim

No caso do terceiro período de estudo (GR3 até Fim), o sistema apresenta uma taxa de falhas crescente comportando-se como um Processo de Poisson Não Homogéneo. Os intervalos de tempo entre falhas tendem a diminuir ao longo do

tempo, evidenciando degradação do sistema, deficiente manutenção ou mesmo má operacionalidade do processo produtivo.

Ao calcular o valor cumulativo do tempo médio entre falhas (CMTBF), recorrendo à expressão 3.16, apresentada no capítulo 3 deste trabalho, para este período de 5148,08 horas de duração, mas com um somatório de horas de bom funcionamento de apenas 4543,97 horas, em que se registaram 78 falhas, vem:

$$CMTBF = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{4543,97}{78} = 58,25 \text{ (horas)}$$

Deste cálculo extrai-se o valor cumulativo do tempo médio entre falhas para todo o período de exploração (4543,97), não é um valor médio para qualquer período de tempo. Se os intervalos de tempo entre falhas tendem a diminuir ao longo do período, significa que o valor cumulativo do tempo entre falhas no início do período é maior que no seu final. Na figura 5.14, demonstra-se graficamente a evolução do CMTBF ao longo do período.

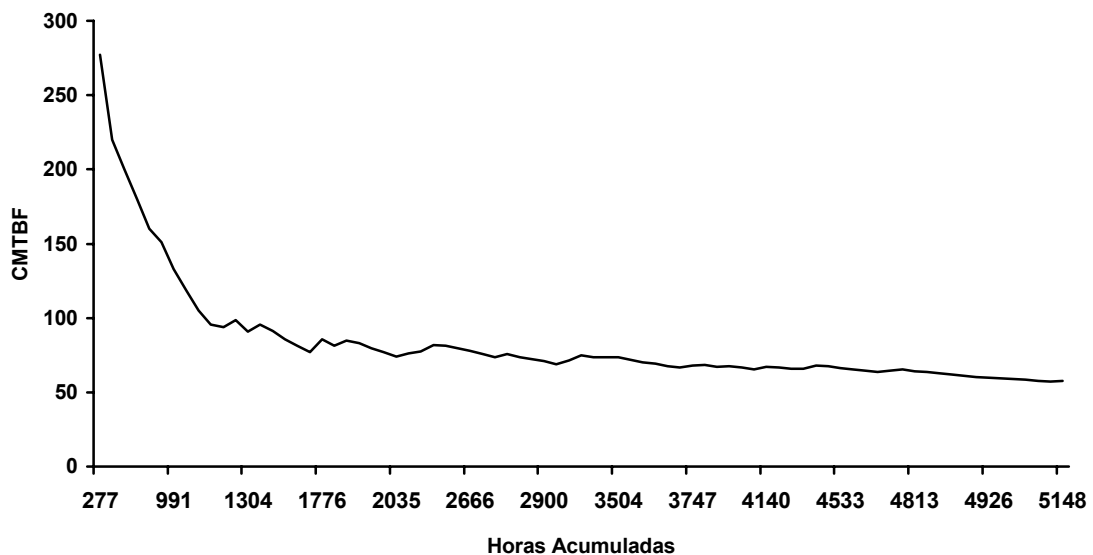


Figura 5.14 – Evolução do CMTBF ao longo do período (GR3 até Fim)

Logo o valor do CMTBF, anteriormente calculado, induz em erro, uma vez que os valores resultantes são a imagem média de todo o período. Na figura 5.14, também está implícito o mesmo erro. Uma vez que, qualquer que seja o valor do CMTBF

encontrado na linha do gráfico, esse índice refere-se ao tempo médio entre falhas desde o início do período até esse momento (valor cumulativo). A expressão para cálculo dos valores do gráfico foi também a expressão 3.16.

Esta informação poderia ser considerada preocupante para a Gestão da Manutenção, se dependesse dela o planeamento correcto das acções de manutenção futuras. Perante a ocorrência de uma taxa de falhas crescente, não faz sentido o cálculo ou estimativa do MTBF para todo o período.

Perante o exposto anteriormente, ir-se-á dividir o período de estudo (GR3 até Fim) em 4 períodos iguais e para cada um deles calcular-se-á o respectivo CMTBF. Deste modo, estar-se-á a apresentar valores mais coerentes, com menor erro acumulado e que melhor quantifiquem/qualifiquem o período de estudo na sua totalidade.

No entanto, será o valor correspondente ao último período, aquele que mais interessará para o planeamento das acções de manutenção a desenvolver. Pois dar-nos-á uma percepção do estado do sistema mais actual. Para além disso, estarão nesse último período, registadas quais as ocorrências mais preocupantes e alertar-nos-á para quais os equipamentos a intervir.

Recorrendo novamente à expressão 3.16, vem:

$$CMTBF = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{1180,67}{13} = 90,82 \text{ horas} \quad (1/4 \text{ do Período})$$

$$CMTBF = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{1204,37}{17} = 70,84 \text{ horas} \quad (2/4 \text{ do Período})$$

$$CMTBF = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{1030,4}{21} = 49,07 \text{ horas} \quad (3/4 \text{ do Período})$$

$$CMTBF = \frac{\sum TBF}{N} = \frac{1128,53}{27} = 41,8 \text{ horas} \quad (4/4 \text{ do Período})$$

A variação dos valores calculados do CMTBF é característica de um sistema reparável com taxa de falhas crescente. O valor correspondente ao final do período, 41,8 horas, é significativamente diferente do valor correspondente ao CMTBF de

todo o período, 58,25 horas. Comprova-se assim, alguma divergência nos resultados obtidos pela mesma expressão, embora se utilize uma metodologia diferente para a obtenção de resultados mais fidedignos e coerentes com o cenário que este período apresenta no seu final.

Para o cálculo do MTTR, proceder-se-á do mesmo modo, embora se torne desnecessário um cálculo tão detalhado. Admitindo que as reparações, acções de manutenção correctiva, são realizadas com a mesma operacionalidade e eficácia para qualquer que seja o comportamento da taxa de falhas, faz sentido calcular o MTTR para o período inteiro. Em termos práticos este valor servirá como elemento comparativo com os tempos de reparação referentes a outros períodos. E poder-se-á calcular também o valor do MTTR para as observações mais recentes, isto é, para o último quarto deste período, que para qual também foi calculado o CMTBF. Deste modo poder-se-á relacionar os dois índices neste mesmo período.

Tal como para o período anterior, não se conhecendo a distribuição estatística que modela valores de tempo das reparações, o valor do MTTR para este período e para o último quarto do período, pode ser calculado de acordo a expressão 3.2.

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} = \frac{604,12}{78} = 7,75 \text{ horas} \quad (\text{Período inteiro})$$

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} = \frac{176,8}{27} = 6,55 \text{ horas} \quad (4/4 \text{ do Período})$$

O valor da disponibilidade média do sistema para este período, pode ser calculado de acordo com a expressão 3.3, admitindo que o valor do MTBF é o valor calculado CMTBF (4/4 do Período).

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{41,8}{41,8 + 7,75} = 0,843 \quad (84,3\%)$$

Também neste período, tal como no anterior, se cometerá erro ao ser comparado este índice, com os anteriores. Uma vez que foi calculado com o MTBF correspondente ao último quarto do período. Este índice não é a imagem de todo o período (GR3 até Fim).

A indisponibilidade média pode ser calculada de acordo com a expressão 3.4.

$$I = (1 - A) = (1 - 0,843) = 0,157 \quad (15,7\%)$$

A estimativa do MTBF do sistema para o período da GR3 até Fim é apresentada no quadro 5.16 conjuntamente com todos os outros indicadores de interesse para o estudo.

**Quadro 5.16 – MTBF e outros indicadores (GR2 até Fim)**

Período de Estudo	CMTBF	MTTR	A	I
GR3 – Fim	41,8	6,55	0,843	0,157

*Nota:* O valor do MTTR para o período inteiro de GR2-Fim é de 7,75 horas

### 5.3.4. Comparação dos resultados obtidos no estudo do tempo médio entre falhas e tempo médio de reparação do sistema

No quadro 5.17 são apresentados, os valores do MTBF e do MTTR de todos os períodos, calculados nos números anteriores, tal como outros indicadores de interesse para o estudo do sistema.

**Quadro 5.17 – Variação do MTBF e outros índices nos vários períodos**

Períodos de Estudo com Taxa de Falhas Constante	MTBF	MTTR	$\lambda$	A	I
Início - GR1	92,074	13,270	0,011	0,874	0,126
GR1 - GR2	84,370	8,890	0,012	0,905	0,095
Período de Estudo com Taxa de Falhas Decrescente	MTBF Estimado	MTTR	$\lambda$	A	I
GR2 – GR3	101,07	8,18	0,0098	0,925	0,075
Período de Estudo com Taxa de Falhas Crescente	CMTBF	MTTR	-	A	I
GR3 – Fim	41,8	6,55	-	0,843	0,157

*Nota:* O valor do MTTR apresentado no quadro para o período de GR2-Fim é relativo às observações mais recentes, sendo o valor do MTTR para o período inteiro de 7,75 horas.

A partir da análise do quadro 5.17, podem-se retirar algumas conclusões do comportamento do sistema ao longo dos períodos estudados.

Para os dois primeiros períodos, cujas taxas de falhas se manifestaram constantes, os valores do MTBF são consideravelmente diferentes. O período da GR1 até GR2



apresentou um número superior de falhas proporcionalmente ao tempo de estudo considerado (importa ter presente que o primeiro período de estudo, tal como o último, não tem a mesma duração que os restantes períodos), facto este que inflacionou o seu tempo médio entre falhas.

O inverso do valor do MTBF representa a taxa de falhas, que não evidencia grandes diferenças para estes dois períodos. Já anteriormente foi analisado que o valor da taxa de falhas não é um revelador significativo do comportamento do sistema para estes dois períodos, comparativamente com as conclusões tiradas a partir dos valores do MTBF.

Também os valores do MTTR são bastante diferentes entre os dois períodos. O tempo médio de reparação foi consideravelmente superior no primeiro período, condicionando assim o valor da disponibilidade média, que se mostrou ligeiramente superior para o segundo período.

Comparando os valores do MTTR em todos os períodos, revelam-se relativas melhorias de período para período. Embora prematuramente se possam analisar os resultados deste indicador, como potenciais melhorias na actuação das acções de manutenção correctiva, aquando das reparações das avarias, também poderão ser reveladores, de reposições rápidas do sistema perante falhas que não careçam de demasiada performance da manutenção.

Para o período GR2 até GR3, foi estimado o valor do MTBF das falhas mais recentes. O valor de 101 horas é revelador de francas melhorias do comportamento do sistema para este período, até porque, apresenta uma taxa de falhas decrescente. Por um lado, poder-se-á ter melhorado a actuação da manutenção, por outro, poderá ter ocorrido uma correcta adequação do sistema ao processo produtivo. O valor do MTBF estimado para as falhas mais recentes deste período é francamente superior ao valor do MTBF calculado para os dois primeiros períodos com taxa de falhas constante.

O valor da disponibilidade para o período GR2 até GR3, foi calculado a partir de um MTBF estimado para as falhas mais recentes e não do período inteiro e por este motivo, não se poderá comparar com os valores da disponibilidade média dos dois

períodos anteriores. Poderá no entanto, ser considerado um óptimo indicador para o planeamento dos próximos períodos de exploração, mantendo-se os mesmos valores do MTBF (estimado) e MTTR.

O cálculo do valor do CMTBF foi revelador do decréscimo do tempo médio entre falhas ao longo do último período (GR3 até Fim). Este índice apresenta valores preocupantes para as observações mais recentes. Pois, o valor cumulativo do tempo médio entre falhas para o final do período é de apenas 42 horas, praticamente metade do valor do “MTBF” dos restantes períodos. Para este período, o teste de Laplace revelou que o sistema se comportou segundo um Processo de Poisson Não Homogéneo com uma taxa de falhas crescente.

As conclusões a que se chega, após esta análise, comprovam mais uma vez a tendência do sistema de cozedura do cimento para a diminuição dos seus índices de disponibilidade e Fiabilidade. O número de paragens imprevistas veio aumentado drasticamente e de forma preocupante. A causa de falha com o maior número de ocorrências para o período da GR3 até Fim foi a causa F26 (Encravamento de Ciclones).

Os valores do MTTR calculado tanto, para o período inteiro, como para o último quarto do período da GR3 até Fim, são mais baixos relativamente aos períodos anteriores, o que parece prenunciar a ocorrência de falhas cuja reparação ou reposição do sistema é mais rápido. Na realidade, neste período, mais concretamente para as últimas observações, a causa de falha com mais frequência ocorrida foi a causa F26 (Encravamento de Ciclones). O tempo de reposição do sistema após falha perante esta causa, em média, é relativamente mais alto, comparando com o tempo de reposição perante a ocorrência de falha com outro tipo de causas para este mesmo período. No entanto, neste último quarto de período, as restantes causas de falha ocorridas são, na sua grande maioria, de rápida reparação, o que faz baixar a média dos tempos de reparação globais. Assim, pode-se afirmar, ser a causa de falha F26 a grande responsável pela baixa Fiabilidade do sistema neste período.

Esta afirmação toma mais firmeza quando relacionados os tempos de reparação por tipo de causa com o número das respectivas observações para o da GR3 até Fim no quadro 5.12 deste capítulo. A causa de falha F26 apresenta 260 horas de reparação para as 29 ocorrências registadas.

## **5.4. Fiabilidade do Sistema de Cozedura de Cimento**

Foram caracterizados os 4 períodos de estudo quanto à ocorrência e tendência da taxa de falhas e calculados alguns índices que quantificam o comportamento do sistema no âmbito da Gestão da Manutenção. As ferramentas estatísticas e as metodologias utilizadas permitiram um cálculo mais preciso desses índices e a determinação das falhas com maior incidência, responsáveis pela baixa disponibilidade do sistema. Todo o trabalho realizado pressupõe uma recolha de dados da sequência das falhas, ordenados cronologicamente.

Assim, estão criadas as condições óptimas para estudar a Fiabilidade do sistema, aplicando modelos estatísticos adequados que conduzam a resultados estatisticamente correctos. O conhecimento da tendência verificada nas taxas de ocorrência de falhas, permite adequar o tipo de modelo mais indicado para estimativa da Fiabilidade (Dias, 2002). No entanto, não se insere no âmbito desta dissertação o estudo da Fiabilidade, mas sim, focalizar eventuais problemas de disponibilidade do sistema de modo a tomar medidas correctivas e preventivas mais convenientes. Como é evidente, ao contribuir-se para um melhor índice de disponibilidade, estar-se-á a promover o aumento da Fiabilidade.

Neste número, será utilizada a uma expressão, habitualmente usada como modelo de cálculo de “Fiabilidade” na indústria cimenteira. A referida expressão encontra-se referenciada em literatura da área, nomeadamente, em Alsop et al. (2001) e documentação interna do CPL.

Esta expressão é usada como um dos indicadores de desempenho do sistema de cozedura do cimento, cuja designação é dada como “Coeficiente de Fiabilidade”.

Então:

$$\text{Coef. Fiabilidade} = \frac{\sum HM}{\sum HM + \sum HPI} \quad (\text{valor ideal} = 0,98)$$

Onde:

$\sum HM$  = Total de horas de marcha do forno;

$\sum HPI$  = Total de horas de paragens imprevistas do forno.

Na realidade, esta expressão, não é mais do que o índice de disponibilidade média do sistema para um determinado período de tempo.

Calculando, através desta expressão, o “Coeficiente de Fiabilidade” para os 4 períodos de estudo do sistema, vem:

$$\text{Coef. Fiabilidade} = \frac{2117,7}{2117,7 + 305,22} = 0,874 \quad (\text{Inicio até GR1})$$

$$\text{Coef. Fiabilidade} = \frac{7677,67}{7677,67 + 809} = 0,905 \quad (\text{GR1 até GR2})$$

$$\text{Coef. Fiabilidade} = \frac{7314,33}{77314,33 + 850,7} = 0,896 \quad (\text{GR2 até GR3})$$

$$\text{Coef. Fiabilidade} = \frac{4543,97}{4543,97 + 604,12} = 0,883 \quad (\text{GR3 até Fim})$$

Todos os períodos apresentam um “Coeficiente de Fiabilidade” abaixo do valor ideal. Ou seja, um índice de disponibilidade média do equipamento para a produção relativamente baixo. Os valores apresentados caracterizam os períodos por completo, isto é, representam a disponibilidade média do sistema de cada período de estudo. Este indicador não pode de modo algum ser considerado para quantificar a Fiabilidade do sistema, uma vez que, segundo Dias (2002), tecnicamente a

Fiabilidade é a probabilidade de um sistema desempenhar uma função especificada, segundo dadas condições operacionais, durante um determinado período de tempo estabelecido.

## **5.5. Discussão dos Resultados e Propostas de Melhoria**

Em suma, o último período de estudo apresentado neste trabalho é o mais preocupante (período da GR3 até Fim), visto que os intervalos de tempo entre falhas tendem a diminuir ao longo do tempo. Apresenta uma taxa de falhas crescente, reveladora de uma “Fiabilidade Decrescente”. Embora se justifique tal situação, perante a ocorrência de inúmeras falhas, é importante referir que a causa de falha F26 (encravamento de ciclones), foi a que mais contribuiu.

Também se registaram bastantes falhas no fornecimento de energia eléctrica, mas é considerada uma causa externa, não dependendo assim de factores de Manutenção do CPL. As falhas no fornecimento de energia eléctrica registaram-se, em maior número, no início do período (GR3 até Fim), logo não contribuíram para que a taxa de falhas se manifestasse crescente.

Neste número, serão apresentadas justificações para a ocorrência das falhas que mais contribuíram para a diminuição do tempo de operação/exploração do sistema e também as soluções implementadas e outras propostas, procurando condições de melhoria ao processo produtivo.

### **5.5.1. Causa de falha F26, Encravamento de Ciclones**

A causa de falha F26 (Encravamento de Ciclones) teve um número superior de ocorrências em todos os períodos estudados. Deste modo, pode-se concluir ser a F26 a principal causa a contribuir negativamente para a baixa disponibilidade do sistema.

Interessa analisar todas as causas e os motivos que levaram o sistema a ter uma taxa de falhas a apresentar uma tendência crescente no período de GR3 até Fim. Dessa análise poderão resultar conclusões que levem à solução do problema.

O motivo ou motivos que levaram o sistema a ter tal comportamento pode ter várias origens, podendo elas serem da má concepção do plano de manutenção, da incorrecta actuação nas acções de manutenção, da substituição de componentes de baixa Fiabilidade, da degradação acentuada do equipamento, do envelhecimento do sistema, da má operacionalidade do sistema, das alterações no processo produtivo que contribuam para um não devido ajustamento dos equipamentos, do desadequado dimensionamento para os actuais níveis de produção, da alteração da carga imposta ao sistema, da alteração das matérias-primas, entre outras.

Em parte do período da GR2 à GR3, fizeram-se testes de queima utilizando um novo combustível. O período da GR3 até Fim coincide com a substituição do combustível de queima introduzido no sistema. O combustível que se usara até então era o carvão mineral que após ser moído era injectado para a queima no forno através da tubeira. No entanto, é possível utilizar outros tipos de combustível com maior ou menor poder calorífico. Na tentativa de minimizar os custos de produção, uma das soluções encontradas foi o uso percentual (conjuntamente com o carvão) ou mesmo total de um outro combustível, o *pet-coke*. Este combustível é sem dúvida menos dispendioso e possui um poder calorífico mais elevado que o carvão. O uso do *pet-coke* em substituição ao carvão é sem dúvida vantajoso do ponto de vista económico (de acordo com informação dos técnicos do CPL), uma vez que os custos de produção do cimento diminuem significativamente, tanto mais, quanto maior for a percentagem de *pet-coke* a usar. Para além disso, quanto maior for o teor de enxofre contido no *pet-coke*, mais baixo é o seu preço. Os valores do *pet-coke* no mercado aliciam a indústria cimenteira, e não só, ao seu uso.

Mas em contrapartida os efeitos no processo produtivo fazem-se sentir. As reacções químicas no interior do forno são alteradas com a referida substituição. Facto que levou a um reajustamento do mesmo, nomeadamente na quantidade e qualidade da matéria-prima a alimentar o forno.

Todas estas alterações vieram contribuir para o aumento da formação de crostas de matéria-prima nos ciclones da torre de pré-aquecimento. E por sua vez, contribuir para o aumento dos encravamentos dos respectivos ciclones, situação esta que acontece com mais frequência sempre que se soltam as crostas formadas nas paredes dos ciclones. O aumento do enxofre no processo (enxofre contido no *pet-coke* que após a queima circula conjuntamente com os gases quentes que se dirigem para a torre de ciclones) é propício à formação de crostas, principalmente nas zonas onde a matéria atinge elevada temperatura.

No período da GR2 à GR3, embora apresente uma taxa de falhas decrescente, é notório o elevado número de ocorrências da causa de falha F26 (encravamento de ciclones). Facto este, coincidente com os testes do uso de *pet-coke* como combustível de queima, denotando-se uma maior ocorrência deste tipo de causa, a partir do meio do período. No período da GR3 até Fim, é notório que o facto de apresentar uma taxa de falhas crescente, se deve à elevada frequência com que ocorre a causa de falha F26 (encravamento de ciclones), sobretudo no final do período. Este último período é caracterizado pelo pleno uso do *pet-coke*.

A substituição do combustível é sem dúvida uma explicação que pode ser avançada no que respeita à formação de incrustações de matéria e consequente aumento da ocorrência dos entupimentos dos ciclones neste período. Contudo, existem outras possíveis razões a contribuir para a mesma causa, uma vez que, mesmo antes da substituição do combustível ocorriam encravamentos nos ciclones, embora com menos frequência. Outras razões que podem contribuir para o problema acima citado são:

- Variação na composição da matéria;
- Variação no caudal de alimentação à torre de pré-aquecimento;
- Variações nas temperaturas de pré-aquecimento;
- Variações na tiragem dos gases da torre de pré-aquecimento (provocam também variações de temperaturas);
- Instabilidade na queima do forno;
- Degradação dos equipamentos;

- Incorrecto funcionamento dos *clapets*, entre ciclones;
- Concepção dos equipamentos.

Como forma de minimizar a ocorrência de incrustações nos ciclones, são apresentadas alguns pontos que deverão ser tomados em consideração:

- Dar especial atenção à temperatura no ciclone 4. Constata-se uma maior tendência para o seu encravamento, quando a sua temperatura se eleva;
- Nos ciclones 1 e 2, será necessário controlar devidamente as tiragens de gases, asseguradas pelo ventilador da torre de pré-aquecimento. O funcionamento incorrecto desta tiragem, pode provocar um aumento da temperatura nos ciclones, proporcionando facilidades à formação de incrustações;
- Controlar devidamente a alimentação de cru, à torre de pré-aquecimento. Realizar as variações de caudal de cru de modo progressivo, evitando alterações bruscas;
- O modo como é conduzido o forno, nomeadamente a sua queima, condiciona a variação das temperaturas nos ciclones. Dever-se-á dar especial atenção à estabilidade da queima no forno;
- Alertar os operários para uma vigia mais incidente aos *clapets* entre ciclones, verificando periodicamente a sua funcionalidade e intervindo se necessário, desobstruindo a passagem da matéria;
- Substituir o *clapet* do ciclone 3, visto que apresenta bastantes problemas na sua operacionalidade. Nem sempre corresponde quando solicitado;
- O equipamento (torre de ciclones) não se encontra obsoleto, embora a sua concepção não seja actual. Face a equipamentos actualmente mais sofisticados e de maior Fiabilidade para o processo em causa, seria aconselhável a sua substituição. No entanto, está posta de parte esta solução, pois segundo os técnicos do CPL, economicamente será



inviável, uma vez que obedeceria a elevadas alterações de estrutura e do processo.

Apesar de serem aconselhadas as medidas anteriores, como forma de minimizar a ocorrência de incrustações nos ciclones, foram encontradas algumas soluções como meios de as eliminar. Tanto quando formadas, e ainda de reduzida dimensão, como também perante a ocorrência de entupimentos nos ciclones, facilitando assim a operação de desobstrução dos mesmos. Os possíveis meios apontados como solução são:

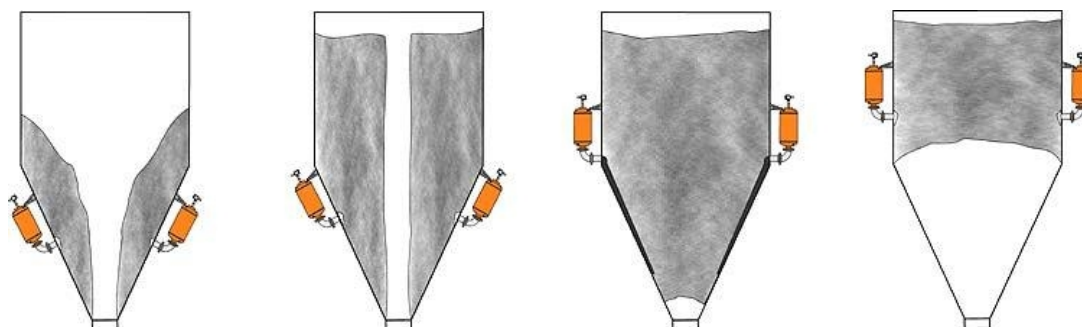
- Instalação de sondas *Gamma*, no cone do ciclone 4. Estas sondas servem apenas para detectar obstrução à saída dos ciclones, nomeadamente por crostas que se soltam. Um inconveniente é o facto de possuírem material radioactivo na sua constituição;
- Instalação de canhões de ar, ao longo da torre. Realizam disparos de ar comprimido à face das paredes interiores dos ciclones, desagregando as crostas formadas;
- Instalação de dispositivos para disparo de *Cardox*'s. Dispositivos, estrategicamente colocados, que permitem a adaptação de canhões (sempre que necessário), usando cargas com hidrogénio e outros químicos, que provocam explosões controladas no interior dos ciclones;
- Mais portas de vigia nas condutas de matéria. Com o objectivo de controlar melhor a evolução de possíveis crostas e entupimentos, permitindo também mais versatilidade nas operações de desencravamento;
- Modificação do local das sondas de pressão. Estas sondas, cuja função é realizar a leitura da pressão no interior dos ciclones, estão colocadas em zonas muito propícias à formação de crostas. Uma vez obstruídas com matéria não fornecem informação preciosa ao controlo do processo. Através dos valores da pressão no interior do ciclone, da sala de comando é possível prever encravamentos com a

antecedência necessária para a sua desobstrução, não sendo necessário parar o processo.

Perante a lista de soluções atrás apresentada, a instalação de canhões de ar nos ciclones da torre de pré-aquecimento, é a que mais relevância aponta como meio de impedir a formação de crostas de grande dimensão.

Os referidos canhões realizam disparos de ar comprimido (6 bar) periodicamente, expelindo as pequenas crostas que se formam nas paredes dos ciclones. A localização para a instalação dos canhões deverá ser equacionada de modo a que a sua actuação abranja as zonas mais críticas. Também a periodicidade dos disparos poderá ser programada, consoante a zona seja de maior ou menor probabilidade à formação de crostas. Sendo possível ainda, adequar essa periodicidade, sempre que necessário, perante a confirmação de resultados após a sua aplicação.

Na figura 5.15, são esquematizadas aplicações de canhões de ar comprimido em ciclones, para diferentes tipos de formações de crostas e entupimentos.



**Figura 5.15 – Aplicação de canhões de ar comprimido em ciclones**

Fonte: [www.vsr-industrietechnik.de](http://www.vsr-industrietechnik.de), em 20 de Dezembro de 2004

Foram aplicados 35 canhões de ar comprimido, nos ciclones 2, 3 e 4 da torre de pré-aquecimento e ainda na chamada câmara de fumos, colectores de matéria à entrada do forno. Na saída dos ciclones 3 e 4 para a câmara de fumos e na saída desta para o forno, também se registaram alguns entupimentos, logo foi também contemplada para esses locais, a respectiva instalação dos canhões de ar. As figuras 5.16 e 5.17

ilustram a disposição dos canhões de ar instalados no ciclone 4 e na câmara de fumos, respectivamente.



Figura 5.16 – Disposição dos canhões de ar instalados no ciclone 4 da torre de pré-aquecimento



Figura 5.17 – Disposição dos canhões de ar instalados na câmara de fumos junto à entrada para o forno

No anexo V, são apresentados desenhos técnicos que mostram a disposição equacionada para a instalação dos canhões de ar por ciclone. Encontra-se ainda no

anexo V, uma pequena descrição do funcionamento e instalação dos canhões de ar, algumas figuras que mostram diversos aspectos do equipamento e um conjunto de fotografias que ilustram a disposição dos canhões instalados nos diversos equipamentos.

Mas, apesar desta solução encontrada solucionar parte do problema, não impossibilita os encravamentos na sua totalidade. Provavelmente ter-se-á que instalar um sistema mais complexo de canhões de ar comprimido nos vários ciclones, uma vez que se julga serem em número insuficiente e não actuarem convenientemente para uma melhoria desejada do processo produtivo.

Seria conveniente abandonar o uso de *pet-coke* como combustível visto terem sido detectados os inconvenientes atrás mencionados. No entanto, o cenário encontrado perante o seu uso não é de todo desanimador, uma vez que existem soluções para minimizar os problemas inerentes. Uma vez preconizado o uso do *pet-coke* como combustível único a ser queimado no processo devido às vantagens económicas encontradas, é de primordial importância equacionar outras soluções para o melhoramento da disponibilidade do sistema. Nomeadamente, no sentido de reduzir a quantidade de enxofre contida nos gases que sobem a torre de ciclones para pré-aquecerem a matéria-prima, soluções essas que possam já ter sido aplicadas noutras fábricas de indústria cimenteira. As vantagens económicas encontradas perante o uso do *pet-coke*, em termos quantitativos, ultrapassam amplamente os custos suportados para a implantação de soluções na resolução dos problemas que dele advêm.

É conveniente salientar também que o final deste estudo coincide com o início de alguns testes realizados no sentido de avaliar o comportamento do sistema perante diferentes condições impostas no processo. Mais precisamente, testou-se o sistema usando *pet-coke* com diferentes percentagens de enxofre, variou-se a dosagem de matéria-prima a alimentar o forno, testou-se a variação da temperatura do forno e temperatura dos gases à saída do forno e avaliou-se a quantidade de enxofre nos gases do pré-aquecimento. Pretendeu-se analisar o comportamento do processo perante várias alterações de modo a equacionar as soluções mais apropriadas a implantar durante a subsequente Grande Reparação.

### **5.5.2. Causa de falha F23, Sistemas de Transmissão e causa de falha F22, Lubrificação**

Após a análise dos dados, verifica-se que estes dois tipos de causa de falha, estão bastante relacionados entre si. Foram também tecnicamente validados pela equipa de manutenção do CPL.

Registaram-se apenas ocorrências com a causa F23 (Sistemas de Transmissão) no último período de estudo, isto é, da GR3 até ao Fim. No entanto, registaram-se ocorrências com a causa F22 (Lubrificação) nos períodos da GR1 até GR2 e da GR2 até GR3.

As falhas de lubrificação registadas nos dois períodos referidos, tinham como causa problemas de caudal e baixa pressão de óleo na lubrificação do redutor do motor principal do forno. Esses problemas foram solucionados na altura, através do aumento do caudal e da pressão do óleo para a referida lubrificação.

No período da GR3 até Fim, observaram-se 7 falhas com a causa F23 (Sistemas de Transmissão), cujas reposições do sistema somaram 100 horas. As falhas de sistemas de transmissão ocorreram unicamente nas várias chumaceiras dos roletes do forno. Estas ocorrências registaram-se com mais incidência nas chumaceiras dos roletes junto ao final do forno (figura 5.18). Esta zona do forno é bastante crítica por vários aspectos, nomeadamente, por suportar elevadas temperaturas uma vez que coincide com a localização do dardo da chama do forno. As chumaceiras apresentavam temperaturas bastante altas, o que significava não estarem a ser convenientemente lubrificadas. A solução encontrada para este problema foi a substituição do óleo lubrificante, para outro com maior viscosidade e melhor comportamento a altas temperaturas. O óleo lubrificante até então usado, não era adequado para dissipar o calor a que estava exposto e realizar uma correcta refrigeração às chumaceiras.

As falhas no redutor do motor principal do forno ocorrem com alguma frequência, o que levou a que o assunto fosse detalhado. O facto de ocorrerem disparos do motor principal do forno sem motivo aparente, também poderá estar relacionado com a má

lubrificação do seu redutor, que lhe provoca algum esforço adicional. Foi sugerido e tecnicamente validado pela equipa de manutenção do CPL, a utilização de um óleo com características mais adequadas para este equipamento. O óleo da lubrificação do redutor do motor principal do forno deverá também ser substituído para outro de características mais apropriadas para a sua função, uma vez que este sistema se encontra também junto ao forno e suporta elevadas temperaturas dele provenientes.

Segundo os técnicos do CPL, a substituição do óleo das chumaceiras dos roletes do forno deverá minimizar, ou mesmo anular, estes tipos de falha.

Na figura 5.18, pode-se observar um rolete e 2 chumaceiras do apoio de um dos lados no final do forno. As chapas que se encontram sobre as chumaceiras protegem-nas, atenuando o calor emanado do forno. Os 2 pequenos ventiladores, direccionados para as chumaceiras têm como função refrigera-las. Embora pareça uma solução contingente, o efeito produzido é satisfatório. São accionados apenas quando são detectadas temperaturas críticas nas chumaceiras, normalmente perante temperaturas ambientais elevadas.



Figura 5.18 – Rolete de apoio do forno, junto à beíça do forno

Em termos económicos, uma vez que se consomem quantidades de óleo lubrificante consideráveis, será aconselhável a realização de análises periódicas aos óleos

(manutenção condicionada). Deste modo, testam-se as propriedades e as condições em que se encontra o lubrificante para assegurar as exigências do seu trabalho, permitindo uma gestão mais fiável na programação da sua mudança. Por um lado, permite antever qual o momento para a mudança do óleo, evitando paragens imprevistas e uma adequada provisão diminuindo os custos fixos. Por outro, permite também com relativa antecedência, programar a paragem do sistema (processo de produção) para as operações de mudança do óleo, evitando possíveis danos noutros equipamentos e perdas de produção inesperadas, caso a falha ocorra.

### **5.5.3. Causa de falha F19, Forno e causa de falha F27, Refractário**

Também estes dois tipos de causa de falhas têm bastante analogia entre si. As falhas registadas na causa de refractário (F27) estão relacionadas com problemas na protecção térmica da fuselagem do forno (queda de tijolo refractário no interior do forno) e desgaste do refractário do seu queimador (tubeira). Por outro lado, as ocorrências de falhas no forno (F19) relacionam-se na sua maioria, com problemas de desgaste numa das suas extremidades, a beíça. O final do forno, zona de onde cai o clínquer para o arrefecedor, é denominado por beíça de saída. Esta zona é também protegida por material refractário.

As ocorrências de falha com a causa F19 também contribuíram para a diminuição do tempo de exploração do sistema no período GR2 até GR3. Não só pelo número de ocorrências (9 falhas), mas também pelo elevado número de horas de reparação necessárias para a reposição das condições óptimas de funcionamento do processo (153 horas). A duração das reparações perante a ocorrência de falha com a causa F27, embora não tão prolongadas (76 horas), não pode ser desprezada.

Existem diversos tipos e qualidades de refractário para diferentes equipamentos e para diferentes temperaturas suportadas. A sua principal função é proteger os equipamentos das elevadas temperaturas suportadas e ainda evitar a dissipação e perda de calor do interior dos equipamentos. As principais causas e problemas nestes tipos de falha são o desgaste, a fractura e a queda dos tijolos de refractário.

A solução encontrada para os problemas na beija do forno foi aplicada ainda no decorrer do ano de 2003 (GR3). A beija foi reconstruída em betão refractário, o que segundo os técnicos do CPL, foi uma boa alternativa relativamente ao tijolo refractário que até então se utilizava. O comportamento da beija do forno parece ter estabilizado, uma vez que o betão refractário apresenta ser mais resistente ao desgaste perante a queda do clínquer. Os problemas, que antes ocorreram, foram desde essa substituição praticamente inexistentes, embora em Março do ano 2004 se tenha registado a queda de 4 elementos da beija. A explicação, segundo os técnicos do CPL, está relacionada com dois factores. Por um lado, a beija sofreu, tal como todo o tijolo do forno, diversos aquecimentos e arrefecimentos devido a inúmeras paragens por falha de outros equipamentos, levando a várias contracções e dilatações do betão. Por outro lado, o facto de na zona de saída do forno, antes do betão, existir tijolo magnésítico, em nada ajudou à duração do betão na beija. Este tipo de tijolo favorece a formação de crostas, e como estas não são estáveis (formam-se e caem), quando caem têm tendência a levar com elas parte desse betão.

A solução para estes problemas de refractário do forno será a aquisição de tijolo de melhor qualidade e adequado às diferentes zonas do interior do forno. Uma vez que as temperaturas no interior do forno variam e a matéria sofre alterações ao longo do seu percurso durante a cozedura, o tijolo refractário também terá que ter diferentes especificidades consoante as exigências do processo em cada local. É certo que um tijolo de melhor qualidade tem um custo superior na sua aquisição mas, se essa melhoria de qualidade contribuir para a minimização dos problemas, significando diminuição do número e duração das paragens, rentabilizar-se-á com ganhos no tempo de produção acrescido.

Quanto aos problemas de refractário no queimador (tubeira), também foram tomadas algumas medidas e alterações como modo de os minorar. Verificou-se que o desgaste do refractário da tubeira era sempre na mesma zona, a cerca de 15 cm e na parte inferior da sua ponta. Este desgaste deve-se ao facto do ar quente proveniente do arrefecedor arrastar muitas poeiras do processo. Ao entrar no forno, o atrito do ar conjuntamente com as poeiras provoca o desgaste da ponta da tubeira.



A figura 5.19 mostra um esquema onde se faz representar a trajectória do ar e poeiras. Os ventiladores do arrefecedor injectam ar no seu interior que aquece ao passar pelo clínquer quente em contra corrente e proveniente do forno. Parte das poeiras resultantes dessa injeção de ar são levadas de volta ao forno. Devido à configuração do equipamento, a trajectória do ar e poeiras segue tal como a figura 5.19 demonstra através das setas.

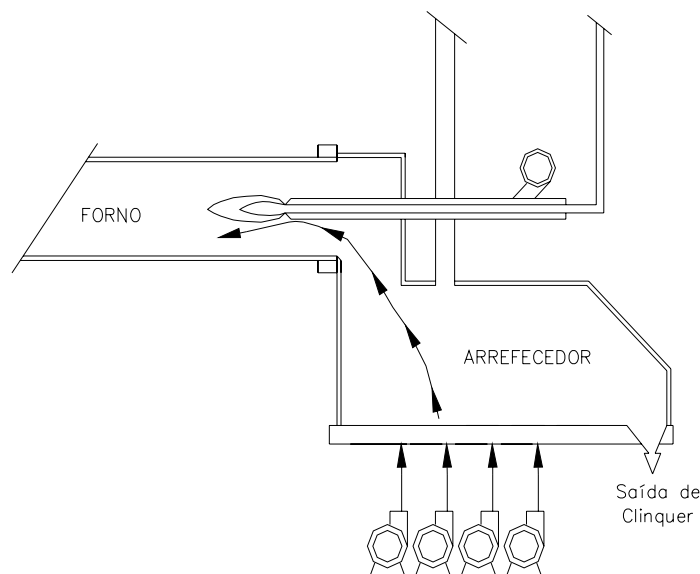


Figura 5.19 – Trajectória de ar quente e poeiras provenientes do arrefecedor para o interior do forno

Em experiências anteriores, aumentou-se o diâmetro de betão refractário na ponta do queimador, o que não deu resultado, pois embora retardasse ligeiramente o seu desgaste, esta solução tem um efeito negativo. Ao aumentar-se o peso na ponta da tubeira, esta abate fazendo com que o dardo da chama se aproxime do talude de matéria e do tijolo no interior do forno. Isto faz com que o tijolo refractário do forno se danifique mais facilmente, pelo facto de se estar a incidir uma chama forte que o queima. Os técnicos do CPL acharam conveniente, após este teste, manter o mesmo diâmetro da tubeira, isto é, voltar à betonagem normal que sempre se praticou. Optou-se então por recuar a tubeira em cerca de 15 cm, até porque segundo os técnicos da produção, a tubeira estava demasiado introduzida no forno comparativamente com outras unidades produtivas e com os valores de referência para este equipamento.

Com o objectivo de controlar as temperaturas a que o betão do queimador está sujeito durante a marcha do forno, equacionou-se a instalação de uma sonda de temperatura no seu interior. Segundo os técnicos do CPL, esta informação pode ser útil para a tomada de decisões sobre o tipo de betão a instalar futuramente na tubeira.

#### **5.5.4. Causa de falha F20, Arrefecedor**

A maioria das falhas ocorridas no arrefecedor provém de problemas nas grelhas da sua corrente de arrasto. Frequentemente partem-se grelhas ou os seus fusíveis mecânicos de protecção. Ocorrem bastantes encravamentos entre as grelhas do arrefecedor devido à existência de blocos de clínquer provenientes do forno com dimensões difíceis de ajustar ao espaçamento entre elas. Este facto leva a que as grelhas suportem demasiado esforço. Quando este esforço é excedido relativamente à resistência dos fusíveis mecânicos, projectados para a protecção do equipamento, estes partem-se. Por vezes os encravamentos obrigam as grelhas a partir também.

As intervenções no interior do arrefecedor só são possíveis após o seu total arrefecimento, dado que as temperaturas são elevadas. Assim independentemente do nível de intervenção que se venha a praticar, tornam-se sempre morosas.

Perante o exposto nos parágrafos anteriores, será aconselhável redimensionar e munir a entrada do arrefecedor com um sistema que homogeneizasse a dimensão dos blocos de clínquer para que melhor se ajustem às grelhas. Esta solução, segundo a opinião dos técnicos do CPL, parece de difícil concepção devido ao estado em que se encontra o clínquer à saída do forno.

Na última Grande Reparação, o arrefecedor foi aberto para manutenção geral e procedeu-se a algumas correcções de acordo com os dados técnicos do fabricante, nomeadamente, correcção de folgas e fixação de apoios.

O fabricante aconselha ainda a substituição das actuais grelhas por outras mais resistentes e mais adequadas às características do trabalho, visto estarem sujeitas a esforços para os quais não foram dimensionadas.

Outro tipo de acontecimento, relativo às grelhas, é o facto de os parafusos das suas fixações se soltarem. Por um lado devido a má concepção dos parafusos e sistema de fixação das grelhas, por outro, o tempo de trabalho sem qualquer tipo de revisão ao local é propício à ocorrência da falha. As actuações de manutenção preventiva e inspecção ao local não são praticáveis sem que ocorra uma paragem prolongada do processo produtivo e remoção total do clínquer, logo estas falhas ocorrem de forma imprevista. Será aconselhável como medida de evitar o desaperto dos parafusos das grelhas, a adaptação de um troço ou freio. Projectar um sistema que impeça o movimento rotacional do parafuso. Normalmente, este tipo de problema mecânico é solucionado com um freio ou um troço que atravessa o corpo roscado do parafuso, impedindo o seu desaperto.

#### **5.5.5. Causa de falha F21, Ventilador de Tiragem do Processo**

Tal como foi referido na descrição das causas de paragem do forno, no capítulo 4, o ventilador de tiragem do processo, tem como função retirar ar quente do topo do ciclone 1 da torre de pré-aquecimento. Deste modo, é realizada a aspiração dos gases que circulam nos ciclones e que provêm do forno. O ar quente proveniente do ciclone contém também muitas poeiras do processo que se alojam nas pás da turbina do ventilador. Quando a quantidade de poeiras agregada nas pás da turbina é elevada e normalmente distribuída de forma não uniforme, provoca vibração ao equipamento. A vibração ocorre devido ao desequilíbrio provocado pela massa (grandes quantidades de incrustações sólidas) que não se distribui uniformemente em torno do centro de rotação (eixo do ventilador). Por outro lado, o facto das pás do ventilador suportarem temperaturas altas (circulação de ar quente), pode também resultar alguma distorção térmica em funcionamento. Resumindo, as vibrações são provocadas por causas operacionais e estão relacionadas com as condições de

exploração do equipamento. Dependem do grau de severidade e agressividade do ambiente em que o equipamento está a operar.

As vibrações atrás referidas têm provocado diversos problemas ao equipamento. Mais concretamente, problemas nas chumaceiras do ventilador que absorvem a força centrífuga produzida pelo desequilíbrio. Aliás, toda a estrutura envolvente absorve essas vibrações, embora sejam as chumaceiras e os seus rolamentos a sofrer o maior impacto. Estas vibrações fazem sentir a sua influência no comportamento dinâmico do rotor, de uma forma gradual e evolutiva no tempo.

Sempre que eram detectados níveis altos de vibração, parava-se o processo para proceder à limpeza das pás da turbina. Também se removiam todos os encrostamentos de poeiras no pavilhão do ventilador. Esta operação obrigava à paragem do processo, contribuindo assim para a diminuição da disponibilidade do sistema para a produção.

Actualmente, controlam-se os níveis de vibração do ventilador a partir da sala de comando através de analisadores de vibrações *on-line*, instalados nas suas chumaceiras. Logo que sejam atingidos níveis de alarme procede-se à limpeza sem parar o processo. Esta operação é realizada injectando areia de decapagem (rica em sílica), na tubagem dos gases, antes do ventilador. A areia é arrastada juntamente com os gases e o seu impacto ao passar pelas pás do ventilador expelle todas as poeiras encrostadas. Neste caso, embora não se esteja a aplicar uma técnica de projecção directa, o seu efeito é essencialmente o mesmo. Pois o elemento abrasivo, a área, é transportada e projectada pelo próprio processo, através dos equipamentos. A grande vantagem deste procedimento é evitar tempos mortos. Porém, este tipo de tratamento (limpeza), por projecção de elementos abrasivos pode deteriorar a superfície e alterar propriedades e dimensões aos equipamentos. A areia acaba por ser adicionada à matéria que se encontra a ser processada nos ciclones, sem contribuir para qualquer alteração na qualidade do produto e sem necessidade de se proceder a reciclagens.

Foram ainda registadas algumas ocorrências de falhas devido a problemas no motor eléctrico do ventilador. Tem sido feito um esforço, por parte dos técnicos do CPL, no

sentido de apurar o motivo que leva o motor a parar. O facto deste equipamento estar sujeito a elevadas temperaturas no seu ambiente de trabalho, tem sido a principal razão apontada. No entanto, esta causa pode encontrar-se também combinada com outros factores dadas as circunstâncias do seu trabalho ser bastante exigente.

### **5.5.6. Outras causas de falha**

As ocorrências registadas na causa de falha F04 (Sub-Estação/Sala Eléctrica) estão na sua maioria relacionadas com problemas nos transformadores, nomeadamente nas suas protecções. Foram detectados defeitos de fabrico nos sistemas de protecção de média tensão, o que provocava disparos inesperados na rede eléctrica de 6kV, perante pequenas oscilações na corrente eléctrica. Diante de tais incidências, foram substituídos todos esses sistemas de protecção. De acordo com os técnicos do CPL, julga-se ter solucionado o problema mais grave de indisponibilidade relacionado com a sub-estação.

As razões mais comuns para a ocorrência de falha com a causa F05 (Tensão de Comando e Instrumentação) são a suspensão inesperada do comando de alguns equipamentos, a partir da sala de comando. Quando é detectada a interrupção do controlo e comando de equipamentos críticos, colocando em risco a segurança e as especificações do produto, o processo pára. Estas situações são pontuais e não têm sido consideradas graves nem muito preocupantes, embora no último período de estudo, as 2 ocorrências registadas tenham contribuído com mais de 12 horas para a indisponibilidade do sistema. Estas situações relacionaram-se com falhas de cariz electrónico no comando do motor principal do forno.

Os disparos do motor principal, causa de falha F24, contribuíram com mais de 22 horas para a indisponibilidade do sistema. Normalmente, esta falha ocorre perante deficiências eléctricas, quedas de tensão ou problemas de aquecimento quando é sujeito a grandes esforços, perante temperaturas ambientais altas e o ventilador não assegura o seu arrefecimento. Conclui-se que o motor do forno é por vezes exposto

a condições de trabalho acima das suas potencialidades. Neste aspecto o sistema estará sub dimensionado. Segundo os técnicos do CPL dever-se-á substituir o motor principal do forno por outro de potência e características mais adequadas.

A causa de falha F25 (Encravamentos/Limpeza/Inspeção) da instalação, é frequentemente relacionada com encravamentos em sem-fins e nas caleiras transportadoras de matéria. Por vezes, quando algumas operações não são devidamente controladas e se excedem caudais, estes encravamentos ocorrem. No último período de estudo, esta falha contribuiu com 10 horas para a diminuição do tempo de operação do sistema.

Quanto aos elevadores, causa de falha F13, para além de em todos os períodos de estudo não se ter registado um número significativo de ocorrências, também o tempo de reposição do sistema, perante tais ocorrências é mínimo. Normalmente estas falhas estão relacionadas com pequenos encravamentos no interior dos elevadores.

Relativamente à maioria das causas de falha estudadas foram encontradas soluções de melhoria baseadas em critérios de Engenharia Mecânica e que se prendem com a componente *Hard* da Gestão da Manutenção. De facto algumas das soluções apontadas foram desenvolvidas em colaboração conjunta com a equipa de Engenharia Mecânica do CPL.

Nesta investigação, por constrangimento de tempo, não foi possível validar algumas das soluções propostas, para as quais seria importante fazer um trabalho de acompanhamento e diagnóstico, que permitisse, eventualmente, difundir os resultados para outros centros de exploração. Pensa-se que este trabalho poderá ser abordado, de uma forma mais intensiva, numa futura investigação.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. Conclusões

Com o trabalho desenvolvido e face à metodologia aplicada, pensa-se ter contribuído com alguma inovação no que se refere à análise do sistema de cozedura de cimento do CPL. Desconhece-se quaisquer aplicações utilizando os modelos estatísticos abordados, que neste caso concreto possibilitaram quantificar e qualificar o comportamento do referido sistema. Acredita-se, contudo, que muito ficou por analisar e que o uso de outras metodologias poderão vir a contribuir para um estudo num âmbito mais alargado. No número seguinte são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, que no caso de serem acatadas, ao certo, serão um contributo importante para o alcance de valores de melhoria do desempenho dos equipamentos em causa.

De um modo geral, a metodologia desenvolvida nesta investigação procurou integrar os principais conceitos no âmbito da Gestão da Manutenção.

Os resultados da presente investigação levaram a algumas conclusões acerca da tendência da taxa de falhas perante a ocorrência de determinadas causas de falha. E, tanto a metodologia aplicada, como os seus resultados interessaram e motivaram a equipa de manutenção do CPL para futuras aplicações.

Convém salientar que foi desenvolvido um grande volume de trabalho na recolha de dados e criação da base de dados, pois a informação disponível por parte do CPL não se encontrava nem classificada, nem organizada para este tipo de trabalho. A ordenação cronológica das falhas ocorridas no sistema de cozedura do cimento e a respectiva selecção das causas importantes foi fundamental para a realização deste trabalho.

O estudo da Taxa de Ocorrência de Falhas (ROCOF – *Rate of Occurrence of Failures*) permitiu avaliar o comportamento global do sistema nos 4 períodos de estudo. Para tal, a aplicação do teste de Laplace permitiu identificar a presença de tendência na sequência cronológica das falhas, isto é, identificou a presença de diferentes Processos de Poisson. A análise gráfica também constituiu uma óptima ferramenta, na medida em que permitiu visualizar o comportamento do sistema ao longo do tempo.

A análise de frequência do número de observações por causa de falha nos 4 períodos de estudo, permitiu ainda identificar quais as causas de falha que mais contribuíram para as respectivas ocorrências.

O sistema revelou ter um comportamento não aleatório no que respeita à tendência da ordem cronológica das falhas, mostrando alguma instabilidade na exploração. Para os 4 períodos destacam-se os seguintes resultados:

- Para os dois primeiros períodos de estudo o sistema comportou-se como um Processo de Poisson Homogéneo, a taxa de falhas foi constante, revelando assim um comportamento aleatório no que respeita à ocorrência de falhas. As causas de falha com maior frequência e/ou maiores tempos de reparação foram:
  - F01 (Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica);
  - F20 (Arrefecedor);
  - F21 (Ventilador de Tiragem do Processo);
  - F26 (Encravamento de Ciclones);
  - F27 (Refractário).



- Para o terceiro período (GR2 até GR3) apresentou uma taxa de falhas decrescente, perante um Processo de Poisson Não Homogéneo. O sistema apresentou melhorias relativamente aos períodos anteriores, embora com um número elevado de falhas. As causas de falha com maior frequência e/ou maiores tempos de reparação foram essencialmente as mesmas:
  - F01 (Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica);
  - F19 (Forno);
  - F20 (Arrefecedor);
  - F21 (Ventilador de Tiragem do Processo);
  - F26 (Encravamento de Ciclones);
  - F27 (Refractário).

A causa F26 evidenciou-se como a mais preocupante. Tanto por ser a de maior frequência, como pelo facto de ter um tempo de reparação acumulado muito elevado.

- Para o quarto e último período de estudo (GR3 até Fim) o sistema comportou-se como um Processo de Poisson Não Homogéneo, mas apresentou uma taxa de falhas crescente. As causas de falha com maior frequência e/ou maiores tempos de reparação foram:
  - F01 (Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica);
  - F20 (Arrefecedor);
  - F23 (Sistemas de Transmissão);
  - F26 (Encravamento de Ciclones);
  - F27 (Refractário).

Também neste último período a causa F26 ocorreu com maior frequência, e foi notório o seu elevado tempo de reparação acumulado.

Perante os resultados desta análise concluiu-se ser a F26 a principal causa de falha a contribuir negativamente para a Fiabilidade do sistema de cozedura de cimento do CPL.

Este estudo teria sido mais rigoroso se a duração dos períodos de estudo fosse igual, isto é, se os dados disponíveis fossem relativos a 4 períodos entre Grandes Reparações.

Concluiu-se também que este sistema, para períodos entre Grandes Reparações com taxa de falhas constante, apresenta o comportamento típico dos sistemas reparáveis. Para um período onde, a sua globalidade apresenta uma taxa de falhas constante (GR1 até GR2), uma análise mais detalhada permitiu observar que a taxa de falhas do sistema seguiu uma trajectória que se assemelha à da “curva da banheira”. Através da análise gráfica conseguiu-se distinguir as 3 zonas distintas que caracterizam a referida curva e deste modo, foi identificado o momento em que o sistema apresentou evidências de degradação (envelhecimento). O crescimento da taxa de falhas do sistema de cozedura do cimento só se acentuou a partir das 7000 horas, aproximadamente 1500 horas antes do final do período. Esta informação é importante para o planeamento das acções preventivas necessárias para assegurar a continuidade do processo produtivo até à próxima Grande Reparação.

Neste trabalho deu-se especial atenção ao papel da manutenção proactiva, que segundo Canuto (2002), por defeito deve visar a redução das falhas, bem como as suas consequências, pois estas sempre acontecerão.

A metodologia utilizada nesta dissertação trabalhou as observações de falha do sistema reparável, que constituem um conjunto de processos estocásticos pontuais, e permitiu determinar, com evidência estatística, as causas das interrupções do processo perante falha e as suas durações de reposição. Nomeadamente, a análise de frequência permitiu também quantificar o somatório das horas de reparação (duração das interrupções) das várias causas de falha nos 4 períodos de estudo. Este tipo de análise é importante na comparação dos tempos de reparação entre diferentes causas de falha por período e entre os diferentes períodos de estudo. Servem também esses valores para posterior comparação com a duração de futuras reparações, para a avaliação das acções correctivas efectuadas e na avaliação dos custos de não-produção perante a ocorrência de cada causa de falha, por unidade de tempo. Como exemplo, poder-se-á referir que para o último período de estudo

apresentado, se obteve uma média de 9 horas para a reparação perante a ocorrência de falhas com causa de falha F26 (encravamento de ciclones).

Segundo Ferreira (1998), aumentar a disponibilidade é um objectivo clássico dos serviços de Manutenção, o que implica, o aumento da Fiabilidade dos equipamentos (MTBF) e a diminuição dos tempos de intervenção (MTTR).

De acordo com a informação recebida da equipa técnica do CPL, o sistema de cozedura de cimento apresentava um baixo índice de disponibilidade relativamente a outros centros de produção com o mesmo tipo de tecnologia de fabrico.

Com a análise realizada aos tempos médios entre falhas e aos tempos médios de reparação, concluiu-se que a tendência do valor da disponibilidade do sistema de cozedura do cimento era para diminuir e reforçou-se a conclusão de que a principal causa de falha, a contribuir para tal, foi a F26 (Encravamento de Ciclones).

O modelo não paramétrico de Crow permitiu avaliar o crescimento do valor esperado do MTBF para o período GR2 até GR3. Permitiu também a demonstração gráfica da evolução do valor esperado do MTBF para um período de vida do sistema. Demonstrou-se que este tipo de análise pode constituir um importante indicador para a optimização do planeamento das acções de Manutenção preventiva, uma vez que fornece uma previsão para a ocorrência de falhas na continuidade de um período que apresente uma taxa de falhas decrescente. Inclusivamente, o modelo de Crow permite definir intervalos de confiança para um determinado MTBF estimado.

Comparando os valores do MTTR, observaram-se relativas melhorias de período para período. Se por um lado o tempo de reparação acumulado aumentou nos últimos períodos, também o número de falhas aumentou, desproporcionalmente. Este facto é a justificação para os valores resultantes do cálculo do MTTR.

No que respeita às soluções implementadas e propostas para condições de melhoria do processo produtivo, considerando as principais causas de falha que contribuíram para a diminuição da disponibilidade do sistema, foi observado que:

- O uso do *pet-coke* em substituição do carvão como combustível de queima provocou o aumento do teor de enxofre nos gases quentes que se dirigem

para a torre de ciclones, o que contribuiu para o aumento da formação de crostas nas paredes dos ciclones. Consequentemente, a formação e queda dessas crostas de grande dimensão aumentou o número de encravamentos nos ciclones;

- A solução encontrada para solucionar o problema dos encravamentos de ciclones foi a instalação de canhões de ar, embora não resolva o problema na sua totalidade. Provavelmente ter-se-á que instalar um sistema mais complexo de canhões de ar comprimido nos vários ciclones, uma vez que se julga serem em número insuficiente;
- Quanto às falhas nos sistemas de transmissão, que se registaram nas chumaceiras dos roletes junto ao final do forno, a solução encontrada foi a substituição do óleo lubrificante, para outro com maior viscosidade e de melhor comportamento a altas temperaturas. Pois, as chumaceiras apresentavam temperaturas bastante altas por não estarem a ser devidamente lubrificadas. Julga-se com esta actuação ter minimizado/anulado as falhas nos roletes do forno;
- É sugerida a utilização de um óleo com características mais adequadas para o redutor do motor principal do forno. Este equipamento encontrar-se também junto ao forno e suporta elevadas temperaturas dele provenientes. Os disparos do motor principal do forno poderão estar relacionados com a má lubrificação do seu redutor, que lhe provoca algum esforço adicional;
- Uma vez que se consomem quantidades de óleo lubrificante consideráveis, nos equipamentos com sistemas de transmissão mecânica, é aconselhável a realização de análises periódicas que testem as condições dos mesmos para o desempenho das suas funções (Manutenção condicionada). Esta metodologia permitirá um melhor planeamento do momento para as mudanças de óleo e consequentemente uma melhor gestão dos custos inerentes;
- A reconstrução da beija do forno em betão refractário mais resistente ao desgaste foi uma boa alternativa relativamente ao tijolo refractário que

anteriormente se utilizava. O comportamento da beija do forno estabilizou, pois as ocorrências de falha com este tipo de causa, que antes se registavam, foram desde essa actuação correctiva praticamente inexistentes;

- Quanto aos problemas de refractário no interior do corpo do forno, aconselha-se a substituição do actual tijolo para outro de melhor qualidade e de diferentes características para as distintas zonas do forno. As temperaturas de cozedura no interior do forno variam ao longo do seu comprimento, logo o tijolo refractário também terá que ter diferentes especificidades consoante a zona em a ser aplicado. O custo superior de um tijolo de melhor qualidade não deverá ser obstáculo para a sua aquisição, atendendo à eliminação dos tempos de não-produção perante este tipo de causa de falha;
- A opção de recuar a tubeira (queimador), em cerca de 15 cm, demonstrou ser uma solução adequada para evitar o desgaste do refractário na sua extremidade. No decorrer do ano 2004, segundo a informação dos técnicos do CPL, verificou-se que o desgaste foi menos acentuado, o que indica a necessidade de proceder a um novo reposicionamento da tubeira;
- Julga-se que as correcções de folgas feitas no arrefecedor de acordo com os dados técnicos do fabricante possam contribuir para a diminuição de grelhas partidas no interior. No entanto, dever-se-á proceder à substituição das actuais grelhas por outras mais resistentes e mais adequadas ao trabalho;
- Ainda para o arrefecedor, será aconselhável projectar e aplicar um sistema que impeça o desaperto dos parafusos das grelhas. Sugere-se a adaptação de um freio que impeça o movimento rotacional dos parafusos;
- A limpeza das pás da turbina do ventilador de tiragem, realizada pela injeção de areia de decapagem na tubagem dos gases, apresenta vantagens, pois esta operação é realizada sem ter de parar o processo produtivo. Contudo, este tipo de limpeza, por projecção de elementos abrasivos pode deteriorar a superfície e alterar propriedades e dimensões das pás do ventilador. Este facto pode também contribuir para o aumento das vibrações no ventilador ao longo do tempo. O desgaste das pás provocado pelos elementos abrasivos,

provocará algum desequilíbrio, visto a massa (peso) da turbina perante o desgaste, não se encontrar uniformemente em torno do eixo de rotação;

- Foi sugerido e tecnicamente validado pela equipa de manutenção do CPL que o motor principal do forno deve ser substituído por outro de potência e características mais adequadas ao trabalho que exerce. Verificam-se disparos do motor principal, muitas vezes, por causa desconhecida. Este motor é exposto a condições de trabalho acima das suas potencialidades.

Assim, foram encontradas as razões e soluções para a maioria das causas de falha do sistema de cozedura de cimento do CPL. Para que este trabalho tenha sido possível, foi notório o envolvimento, o interesse e a colaboração dos técnicos do CPL, desde a fase de recolha de dados e informação diversa até à demonstração de resultados.

Foi proposta a continuidade deste trabalho à actual direcção do CPL. A equipa técnica do Departamento de Manutenção do CPL mostrou interesse na continuação da aplicação da metodologia utilizada nesta dissertação, como forma de averiguar os resultados da implementação das soluções encontradas, assim como de futuras soluções a equacionar. Neste sentido, dois alunos da Curso de Engenharia Mecânica, Ramo Gestão e Manutenção Industrial, da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, disponibilizaram-se para a realização de um estágio académico no CPL. Com o referido estágio, os alunos poderão dar continuidade à recolha de dados e aplicar a metodologia desenvolvida para a análise de novos períodos de estudo. Eventualmente, a comparação com os novos resultados poderá facilitar informação que complemente e auxilie nas decisões a tomar para a minimização do risco de falha no sistema de cozedura de cimento.

Actualmente, o CPL procura posicionar o seu sistema produtivo dentro de valores ideais e conformes com alguns indicadores utilizados a nível internacional. No entanto, embora se recorra aos dados do histórico, a sua análise é mais vocacionada para o campo da gestão e da produção, pecando-se de certo modo na não optimização da Manutenção.

Conclui-se ainda que os registos da sala de comando do CPL deveriam ser efectuados em computador, visto permitir a sua uniformização, rapidez de processamento, redução do tempo de trabalho no departamento de estatística, fácil acessibilidade em qualquer momento e versatilidade para cálculo. Relativamente à forma como os registos de falhas são geridos, os métodos manuais estão a ser preteridos em relação aos computadorizados porém, algumas empresas continuam a usar registos manuais, principalmente, devido à sua facilidade de implementação e ao reduzido custo associado (Julião e Greenough, 2003).

O facto do CPL não possuir um histórico actualizado e adequado, com o registo das ocorrências de falha, impossibilita a correcta avaliação do comportamento dos sistemas, tal como a análise de tendência das falhas e a análise de frequência por causa de falha. Propõe-se que seja implementado um modelo para a classificação dos registos de falha de modo a constituir a base para o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão da Manutenção. Sugere-se que o método utilizado para gerir o registo das falhas, seja o método computadorizado (registos informáticos), e que para tal, seja desenvolvido um programa (*software*) expressamente concebido para a aplicação pretendida, de modo a proporcionar os requisitos necessários para uma utilização satisfatória. A informação em base de dados com registos informáticos permitirá, com bastante versatilidade, a análise e a avaliação contínua da tendência da taxa de falhas e o cálculo de índices de Fiabilidade. Nomeadamente, a metodologia desenvolvida nesta dissertação poderá ser aplicada no programa a desenvolver.

Julião e Greenough (2003) referem que uma base de dados contendo toda a informação da ocorrência das falhas (diagnósticos das falhas, causas e razões para a ocorrência, descrição da reparação e respectivos tempos associados) é uma base consistente para a fase de diagnóstico de falhas futuras. Com este pressuposto garantir-se-á uma identificação mais rápida e precisa da falha e assegurar-se-á que são corrigidas as causas de falha e não apenas os seus sintomas. Julião e Greenough (2003) referem ainda que fornecendo aos operadores de Manutenção um fácil acesso à informação, sobre como as falhas foram diagnosticadas e

reparadas em outras ocasiões, as actuações de reparação futuras serão efectuadas de modo mais eficaz e eficiente.

Perante as citações de Julião e Greenough (2003), poder-se-á propor uma aplicação informática mais ampla. Nomeadamente, a implementação de um sistema CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) que permita o acesso a registos com os diagnósticos de falhas ocorridas, incluindo as descrições de como as falhas foram identificadas, respectivas causas, recursos utilizados e toda a informação que possa ser considerada útil para assistir as actividades de Manutenção. O sistema CMMS proposto poderá eventualmente ser um modelo de trabalho a considerar e que venha a ser utilizado pelos vários centros de produção da CIMPOR, permitindo assim a troca de informação entre centros. Desta forma permitir-se-á um conhecimento mais extensivo e amplo, de extrema utilidade para actuações de manutenção correctiva, perante falhas raras ou de baixa frequência, para as quais determinados pormenores possam ser esquecidos. As experiências e os conhecimentos poderão assim, facilmente ser difundidas entre os centros de produção.

Smith e Hawkins (2004) consideram que a adaptação a um sistema CMMS pode ser difícil para os colaboradores envolvidos, no entanto, os resultados são compensatórios. Perante uma postura TPM poder-se-ão substituir predominantes actuações reactivas de Manutenção correctiva, pelas actuações proactivas de Manutenção preventiva. O CMMS pode otimizar os trabalhos e atributos organizacionais e quantificar as necessidades do sistema. O CMMS fornecerá discernimento dentro da empresa.

A sugestão, para a reformulação do método de registo das observações de falha foi também considerada pela equipa de manutenção do CPL, a qual mostrou interesse em proceder a inovações nesta área.



## 6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido e atendendo à sua pertinência, julga-se que alguns dos temas poderão vir a ser abordados e constituir objecto de investigação em trabalhos futuros, numa lógica de continuidade, de um maior aprofundamento, de uma maior abrangência ou mesmo num âmbito diferente. Assim apresentam-se as seguintes sugestões:

- Em primeiro lugar, sugere-se a continuidade da aplicação da metodologia utilizada nesta dissertação de forma a obter resultados científicos que demonstrem o comportamento do sistema após as soluções implementadas. Os modelos estatísticos utilizados revelaram-se de extrema utilidade para determinar a tendência da taxa de falhas no sistema de cozedura de cimento e permitiram identificar e quantificar as causas de falha mais críticas. Poder-se-á alargar o referido estudo de forma a obter um conhecimento mais abrangente, nomeadamente ao nível do desenvolvimento de modelos apropriados para avaliar a Fiabilidade do sistema, consoante a distribuição estatística que as observações de falha apresentarem;
- Para futuras investigações que pretendam estudar o comportamento de sistemas reparáveis, sugere-se o modelo de ordenação cronológico de falhas utilizado na presente dissertação. O referido modelo consistiu na construção de uma base de dados em folhas de cálculo, contendo a informação recolhida e relativa à ocorrência de falhas, que possibilitou com versatilidade a análise e o cálculo estatístico;
- Sugere-se, face ao cenário encontrado no planeamento da Manutenção do CPL, que se estenda este estudo para a aplicação de modelos mais utilizados na avaliação quantitativa da Fiabilidade de sistemas reparáveis. Uma vez que a distribuição das observações de falha seguem, na sua maioria, distribuições assimétricas, onde indicadores baseados em médias podem conduzir a avaliações menos correctas, sugere-se a aplicação do modelo de riscos proporcionais pressupondo o recurso a testes estatísticos adequados. Segundo Dias (2002), nos últimos vinte anos assistiu-se a um crescimento

acentuado da aplicação destes modelos, embora a sua utilização em sistemas reparáveis seja ainda relativamente escassa. Para além de constituir uma inovação, a estimativa da Fiabilidade segundo esta metodologia, contribuirá para uma melhor compreensão prática do processo de falha do sistema, permitindo em qualquer momento detalhar o equipamento com maior probabilidade de falha;

- A instalação de canhões de ar nos ciclones da torre de pré-aquecimento constituiu uma solução válida para o problema registado com a causa de falha F26 (encravamento de ciclones). Os resultados observados após a referida actuação, de acordo com a informação dos técnicos de manutenção do CPL, relevaram alguma melhoria, pois o número de encravamentos devido à formação de crostas de grande dimensão reduziu. Embora o problema não tenha sido totalmente solucionado, ocorrendo ainda encravamentos nos ciclones, estes acontecem com menos frequência. A causa F26 constitui ainda uma das razões para a diminuição dos tempos de exploração do sistema de cozedura do cimento. Atendendo a estes factos, torna-se evidente a necessidade de persistir na optimização da solução encontrada. Nomeadamente, na optimização e instalação de um sistema mais complexo de canhões de ar comprimido, pois evidenciam ser em número insuficiente e não actuarem convenientemente para uma melhoria significativa do processo produtivo. Assim, considera-se também pertinente um estudo mais aprofundado, no campo da Engenharia Mecânica, que equacione a localização mais adequada para a instalação dos canhões de ar na torre de ciclones e que estabeleça também a periodicidade ajustada dos respectivos disparos. Isto é, trata-se de analisar as zonas mais críticas e de maior probabilidade à formação de crostas, permitindo uma melhor eficiência da actuação dos canhões de ar;
- Face à problemática no uso do *pet-coke*, como combustível de queima no forno e pré-calcinador, sugere-se também um estudo que utilize modelos de regressão (Modelos de Riscos Proporcionais) para a identificação das variáveis mais significativas no processo de falha. Estes modelos permitem

utilizar variáveis contínuas e discretas que, de alguma forma, podem modelar o tempo desde a última falha, por exemplo, em função do número de falhas por encravamento dos ciclones, na presença do *pet-coke*. Considera-se relevante a análise de uma possível influência entre os valores percentuais de enxofre contidos no *pet-coke* usado na queima do forno e as observações de falha por razões de encravamento dos ciclones. Em caso afirmativo, o estudo poderá ainda incidir no âmbito da Engenharia, no sentido de equacionar formas de reduzir a quantidade de enxofre contida nos gases que sobem a torre de ciclones para pré-aquecimento do cru. Em indústrias similares, foram já solucionados problemas idênticos que poderão ser fonte de inspiração para a abordagem pretendida. Recorde-se que o uso do *pet-coke* foi instituído no CPL devido a vantagens económicas encontradas, pois para além de possuir um poder calorífico superior ao do carvão (combustível anteriormente utilizado), o seu baixo preço é aliciante. A diminuição dos custos de produção foi devidamente fundamentada, para esta tomada de decisão. O estudo pode ainda ser mais abrangente e ponderar preocupações ambientais. Isto é, relacionar resultados tanto ao nível da queima do *pet-coke*, como da queima mista com resíduos provenientes de outras indústrias, caso se venha a praticar, face às exigências das normas ambientais da actualidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alsop, P.A., Chen,H., Chin-Fatt, A.L., Jakura, A.J., McCabe, M.I. e Tseng, H.H.** (2001). *The Cement Plant Operations Handbook, The Concise Guide to Cement Manufacture* (3ª ed.). Printed by Bishops Ltd, Portsmouth, United Kingdom. All rights reserved to Tradeship Publications, Ltd.
- Ansell, J.I. e Phillips, M.J.** (1989). Practical Problems in the Analysis of Reliability data (with discussion), *Applied statistics Vol.38, No.2*, pp.205-247.
- Assis, R.** (1997). *Manutenção Centrada na Fiabilidade, Economia das Decisões*. Lisboa: Lidel.
- Bohoris, G.A.** (1996a). Trend Testing for Complex Repairable Systems. *International Journal of Quality & Reliability Management, Vol.13, No.6*, pp. 18-28.
- Bohoris, G.A.** (1996b). Trend Testing in Reliability Engineering, *International Journal of Quality & Reliability Management, Vol.13, No.4*, pp. 45-54.
- Cabral, J.S.** (1998), *Organização e Gestão da Manutenção, dos conceitos à prática*. Lisboa: Lidel.
- Canuto, R.M.F.** (2002). *Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM II). Aplicação numa Industria de Celulose em Portugal*. Tese de mestrado. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências dos Materiais/Secção de Materiais Electroactivos.

- Cholasuke, C., Bhardwa, R. e Antony, J.** (2004). The Status of Maintenance Management in UK Manufacturing Organisations: result from a pilot survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol.10, No. 1, pp. 5-15.
- Cigolini, R. e Turco, F.** (1997). Total Productive Maintenance Practices: A Survey in Italy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol.3, No.4, pp. 259-272.
- CIMPOR**, (2005). *Página oficial da Cimpor – Cimentos de Portugal, S.A.* Recuperado em 2005, Janeiro 17, de <http://www.cimpor.pt>.
- Coimbra, V.L.M., Santos, M.J.M. e Oliveira, G.B.** (1999). *A Indústria Portuguesa do Cimento*, Vol. 2 (2ª ed.). Lisboa: Cimpor – Cimentos de Portugal, S.A.
- Dias, J.A.M., Pereira, Z.L. e Leitão, A.L.F.** (1997a). A Gestão da Manutenção Industrial pela Fiabilidade. *Actas do I Encontro Nacional de Engenharia Industrial, Lisboa, Portugal*.
- Dias, J.A.M., Pereira, Z.L. e Leitão, A.L.F.** (1997b). Fiabilidade em Sistemas de Transformação de Alta Tensão, *Actas do III Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, Havana, Cuba*.
- Dias, J.A.M., Pereira, Z.L. e Leitão, A.L.F.**, (1999). Sistemas Reparáveis: Modelos de Fiabilidade, *Actas do Seminário "Segurança, Fiabilidade e Análise de Avarias"*, Escola Naval, Base Naval de Lisboa.
- Dias, J.A.M.** (2002). *Fiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica*. Tese de doutoramento. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial.

- Doyen, L. e Gaudoin, O.** (2002, Maio). *Stochastic Modeling of Maintenance Effect on System Lifetime*. Comunicação apresentada no 22º Seminário da European Safety, Reliability & Data Association, Madrid.
- Ferreira, L.A.** (1998). *Uma Introdução à Manutenção*. Porto: Publindustria.
- Gomes, A.** (1989). *A Clinqueração da Indústria Cimenteira*. Manual Técnico. Cimpor – Cimentos de Portugal, S.A.
- Guimarães, R.C. e Cabral, J.A.S.** (1997). *Estatística*. Lisboa: McGraw-Hill.
- Julião, J. e Greenough, R.** (2003). Redução de Tempos de Paragens Através do Registo de Falhas. *Revista Manutenção*, n.º 78/79, 3º e 4º trimestre de 2003, pp. 30-38.
- Kobbacy, K.A.H. e Jeon, J.**, Generalized Non-Stationary Preventive Maintenance Model for Deteriorating Repairable Systems, *Quality and Reliability Engineering International*, 18, pp. 363-372.
- Kortelainen, H., Ronkko, K., Silenius, S. e Paivike, A.** (2002, Maio). *Maintenance Data Collection and Utilization in the Process Industry*. Comunicação apresentada no 22º Seminário da European Safety, Reliability & Data Association, Madrid.
- Leitão, A.L.F.** (1989), *Proportional Hazards Methods in Industrial Reliability and Maintenance*, PhD Thesis, University of Birmingham, UK.
- Nunes, C. e Godinho, C.** (2001). *Cimento, Um Sector Dinâmico*. Ministério da Economia, Gabinete de Estratégia e Estudos. Recuperado em 2005, Janeiro 19, de <http://www.gee.min-economia.pt>.

- O'Connor**, P.D.T. (2002), *Practical Reliability Engineering*, (4<sup>a</sup> ed.). Baffins Lane, Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Oliveira**, G.B. (1999). *A Indústria Portuguesa do Cimento*, Vol. 1 (2<sup>a</sup> ed.). Lisboa: Cimpor – Cimentos de Portugal, S.A.
- Pinto**, J.P.O. (1995). *Organização e Gestão da Manutenção*. Curso de Formação. Porto: Cenertec – Centro de Energia e Tecnologia, Lda.
- Roque**, A. (2004, Março). *Inovação, Qualidade e Competitividade*. Comunicação apresentada no Ciclo de Conferencias “Empreender Coimbra 2004”, Coimbra.
- Smith**, R. e **Hawkins**, B. (2004). *Lean Maintenance, Reduce Cost, Improve Quality and Market Share*. Oxford, England: Elsevier Inc.
- Stillman**, R.H. (1999). Modeling Failure Data of Overhead Distribution System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, pp. 1238-1242.
- Souris**, J.P. (1992). *Manutenção Industrial, Custo ou Benefício?*. Lisboa: Lidel.
- Tsang**, A.H.C. e **Chan**, P.K. (2000), TPM Implementation in China: A Case Study, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.17, No.2, pp. 144-157.
- Xia**, P. (1998). *Preventive Maintenance and Opportunistic Maintenance Planning for Transient Multiunit Systems*. PhD Thesis (Dissertation). University of South Florida, Tampa, Florida, USA.

# ANEXO I – Sistema de Cozedura de Cimento

## I.1. Introdução

O presente anexo pretende mostrar através de um esquema elucidativo a disposição sequencial dos equipamentos que compõem o sistema de cozedura de cimentos do CPL.

São apresentadas também fotografias ilustram o equipamento em causa e deste modo possibilitar uma melhor visualização da realidade e percepção da dimensão dos mesmos.

## I.2. Esquema do Sistema de Cozedura de Cimento

Na figura I.1, na página seguinte, as letras encontradas são referentes a:

- A - Retorno de farinha (cru) para silos de farinha;
- B - Retorno de farinha (cru) para silos de farinha;
- C - Entrada de farinha (cru) proveniente dos silos de farinha;
- D - Retorno de farinha (cru) proveniente das caídas dos elevadores de farinha e do despoeiramento de cru;
- E - Entrada de carvão ou *pet-coke* para o pré-calcinador;
- F - Entrada de carvão ou *pet-coke* para a tubeira do forno;
- G - Entrada de *fuel-oil* para a tubeira do forno;
- H - Saída de gases quentes para a moagem de cru;
- I - Saída de gases quentes para a moagem de carvão/*pet-coke*;
- J - Saída de clínquer do elevador para o silo1 de clínquer;
- K - Saída de clínquer do elevador para o silo2 de clínquer;
- L - Saída de clínquer para expedição a granel.



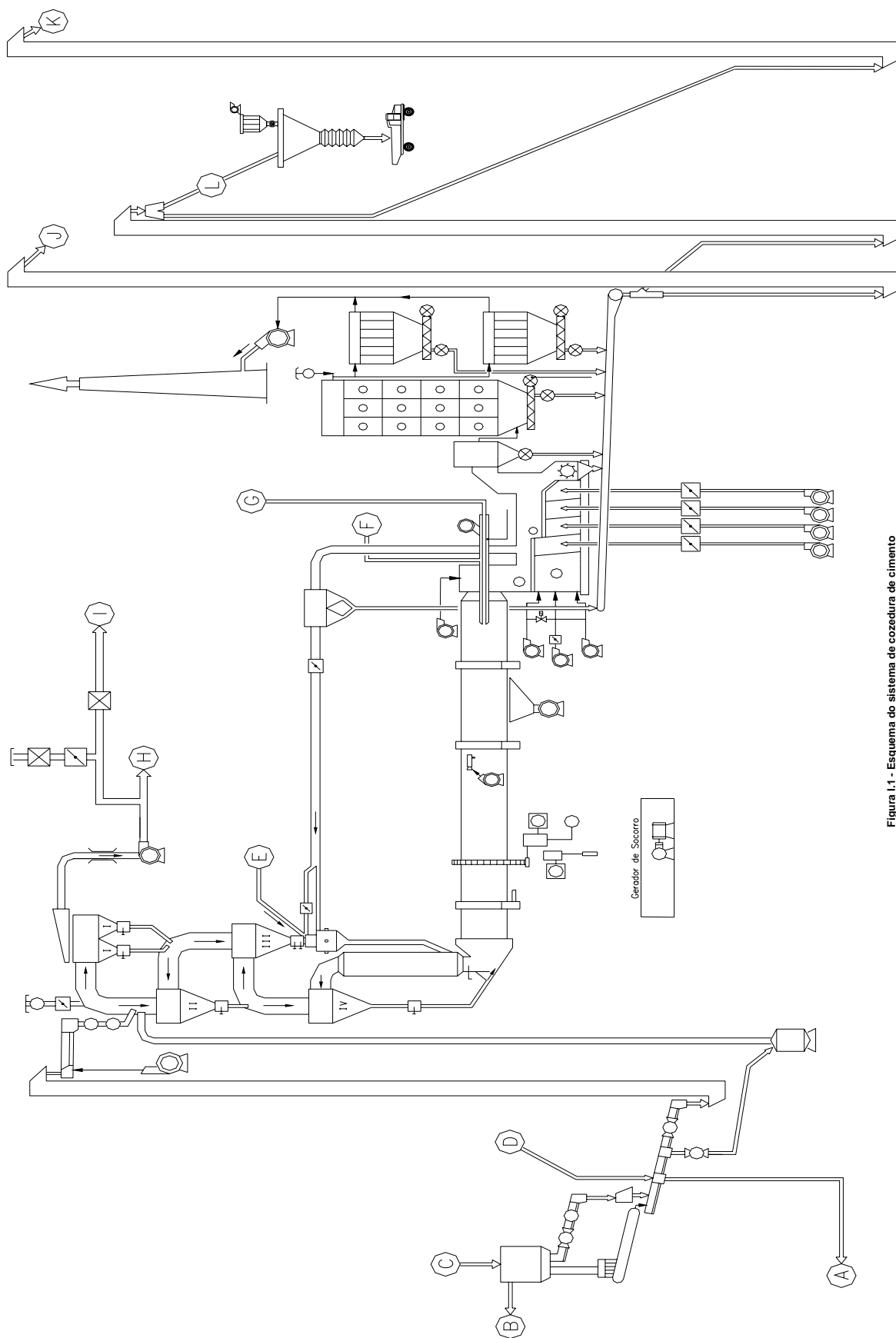


Figura I.1 - Esquema do sistema de cozedura de cimento

### I.3. Fotografias do Sistema de Cozedura



Figura I.2 – Torre de pré-aquecimento e início do forno



Figura I.3 – Torre de pré-aquecimento e forno



Figura I.4 – Forno, visto do topo da torre de pré-aquecimento



Figura I.5 – Arrefecedor



Figura I.6 – Fim do forno e início do arrefecedor



Figura I.7 – Queimador (tubeira), fim do forno





**Figura I.8 – Pré-calcinador na torre de pré-aquecimento**

## ANEXO II – Dados Recolhidos

### II.1. Introdução

Neste anexo apresenta-se a listagem dos dados recolhidos a partir da consulta dos livros de registos da sala de comando do CPL, onde todas as ocorrências são registadas e anotadas de modo a constituírem histórico relatando os diversos acontecimentos do processo. Os dados dizem respeito a registos encontrados relativos aos anos de 2001, 2002 e 2003. Da consulta efectuada foram retirados todos os elementos considerados fundamentais para o estudo em causa, isto é, todos os registos relacionados com a paragem e arranque do forno.

### II.2. Apresentação dos Dados

A listagem é apresentada por ordem cronológica conjuntamente com alguns valores calculados de interesse para o estudo. São apresentadas também as respectivas observações às falhas ocorridas.

No quadro II.1, são identificados os acrónimos contidos no quadro de apresentação de dados recolhidos, listados no quadro II.2.

Quadro II.1 – Acrónimos dos quadros de dados em estudo

N(t)	Ordem Cronológica das Falhas
DP	Data de Paragem do Forno
HP	Hora de Paragem do Forno
DA	Data de Arranque do Forno
HÁ	Hora de Arranque do Forno
TR	Tempo de Reparação da Falha (horas)
$\Sigma TR$	Somatório dos Tempos de Reparação da Falhas (horas)
TBF	Tempo de Bom Funcionamento Entre Falhas (horas)
$\Sigma TBF$	Somatório dos Tempos de Bom funcionamento Entre Falhas (horas)
TT	Total de Tempo de Estudo (horas)
Obs.	Observações, Descriminação da Causa da Falha

Quadro II.2 – Listagem da recolha de dados

N(t)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	Obs.
0	-	-	1-1-01	0:00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	Início do estudo
1	3-1-01	7:00	4-1-01	1:35	18,58	18,58	55,00	55,00	55,00	Conservação programada
2	5-1-01	3:10	5-1-01	10:25	7,25	25,83	25,58	80,58	99,17	Ciclone encravado
3	5-1-01	14:50	7-1-01	21:10	54,33	80,17	4,42	85,00	110,83	Queda da beíça inferior do forno
4	10-1-01	10:15	10-1-01	11:15	1,00	81,17	61,08	146,08	226,25	Fusível partido da grelha do arrefecedor
5	12-1-01	2:55	12-1-01	3:10	0,25	81,42	39,67	185,75	266,92	Fusível partido da grelha do arrefecedor
6	12-1-01	6:45	12-1-01	7:35	0,83	82,25	3,58	189,33	270,75	Energia, corte de corrente
7	14-1-01	20:55	14-1-01	21:55	1,00	83,25	61,33	250,67	332,92	Paragem do ventilador de tiragem do forno, defeito eléctrico
8	17-1-01	2:45	17-1-01	11:05	8,33	91,58	52,83	303,50	386,75	Tubo caído no permutador
9	23-1-01	6:00	24-1-01	10:35	28,58	120,17	138,92	442,42	534,00	Partiu-se apoio do redutor da grelha do arrefecedor
10	6-2-01	10:35	9-2-01	1:30	62,92	183,08	312,00	754,42	874,58	Ventilador de tiragem, problemas
11	9-2-01	16:37	10-2-01	2:30	9,88	192,97	15,12	769,53	952,62	Motor do forno parou
12	19-2-01	1:25	19-2-01	1:40	0,25	193,22	214,92	984,45	1177,42	Desvio da tela do elevador de clinquer
13	19-2-01	12:40	20-2-01	1:25	12,75	205,97	11,00	995,45	1188,67	Ciclone encravado
14	22-2-01	6:40	22-2-01	21:35	14,92	220,88	53,25	1048,70	1254,67	Conservação programada
15	25-2-01	20:30	26-2-01	1:45	5,25	226,13	70,92	1119,62	1340,50	Grelha de arrefecedor partida
16	3-3-01	3:00	3-3-01	11:10	8,17	234,30	121,25	1240,87	1467,00	Electrofiltro
17	9-3-01	5:30	10-3-01	1:40	20,17	254,47	138,33	1379,20	1613,50	Conservação programada
18	10-3-01	8:00	10-3-01	21:30	13,50	267,97	6,33	1385,53	1640,00	Limpeza do ventilador
19	11-3-01	23:25	12-3-01	13:10	13,75	281,72	25,92	1411,45	1679,42	Doseador
20	17-3-01	3:30	17-3-01	6:00	2,50	284,22	110,33	1521,78	1803,50	Doseador
21	18-3-01	5:30	18-3-01	11:25	5,92	290,13	23,50	1545,28	1829,50	Falta de farinha
22	19-3-01	14:10	19-3-01	14:30	0,33	290,47	26,75	1572,03	1862,17	Ciclone encravado
23	20-3-01	5:30	20-3-01	19:35	14,08	304,55	15,00	1587,03	1877,50	Conservação programada
24	31-3-01	9:30	31-3-01	14:30	5,00	309,55	253,92	1840,95	2145,50	Ciclone encravado
25	31-3-01	14:37	31-3-01	17:00	2,38	311,93	0,12	1841,07	2150,62	Ciclone encravado
26	2-4-01	3:45	2-4-01	5:25	1,67	313,60	34,75	1875,82	2187,75	Ciclone encravado
27	3-4-01	10:15	3-4-01	18:00	7,75	321,35	28,83	1904,65	2218,25	Grelha do arrefecedor, fusível partido
28	4-4-01	18:00	7-4-01	2:00	56,00	377,35	24,00	1928,65	2250,00	Tijolo de refractário, soltou
29	11-4-01	13:50	11-4-01	15:15	1,42	378,77	107,83	2036,48	2413,83	Sub-Estação
30	11-4-01	22:55	12-5-01	13:30	734,58	1113,35	7,67	2044,15	2422,92	Grande Reparação
31	12-5-01	15:15	12-5-01	17:00	1,75	1115,10	1,75	2045,90	3159,25	Grelha partida do arrefecedor
32	12-5-01	20:00	13-5-01	16:25	20,42	1135,52	3,00	2048,90	3164,00	Motor do forno parou
33	13-5-01	18:20	13-5-01	19:15	0,92	1136,43	1,92	2050,82	3186,33	Motor do forno parou
34	13-5-01	20:50	13-5-01	23:00	2,17	1138,60	1,58	2052,40	3188,83	Sem-fim encravado
35	16-5-01	16:30	16-5-01	21:00	4,50	1143,10	65,50	2117,90	3256,50	Falta de farinha
36	18-5-01	15:25	18-5-01	17:45	2,33	1145,43	42,42	2160,32	3303,42	Conservação programada
37	18-5-01	20:40	18-5-01	23:00	2,33	1147,77	2,92	2163,23	3308,67	Falha no fornecimento de energia eléctrica
38	22-5-01	6:55	22-5-01	12:05	5,17	1152,93	79,92	2243,15	3390,92	Doseador
39	26-5-01	3:30	26-5-01	4:30	1,00	1153,93	87,42	2330,57	3483,50	Controlador de rotações
40	27-5-01	5:05	27-5-01	7:20	2,25	1156,18	24,58	2355,15	3509,08	Defeito eléctrico no ventilador de tiragem do forno
41	28-5-01	10:30	28-5-01	12:50	2,33	1158,52	27,17	2382,32	3538,50	Problemas na Sub-Estação
42	28-5-01	14:10	28-5-01	15:30	1,33	1159,85	1,33	2383,65	3542,17	Comando, problemas
43	3-6-01	3:00	3-6-01	7:50	4,83	1164,68	131,50	2515,15	3675,00	Disparo do motor principal
44	3-6-01	7:55	3-6-01	11:15	3,33	1168,02	0,08	2515,23	3679,92	Ciclone encravado
45	5-6-01	5:00	6-6-01	17:45	36,75	1204,77	41,75	2556,98	3725,00	Conservação programada
46	8-6-01	8:10	8-6-01	8:30	0,33	1205,10	38,42	2595,40	3800,17	Ventilador
47	12-6-01	8:20	12-6-01	8:35	0,25	1205,35	95,83	2691,23	3896,33	Ventilador
48	13-6-01	21:30	13-6-01	22:35	1,08	1206,43	36,92	2728,15	3933,50	Sub-Estação
49	16-6-01	8:35	16-6-01	8:50	0,25	1206,68	58,00	2786,15	3992,58	Ventilador de tiragem do processo
50	19-6-01	16:25	19-6-01	20:50	4,42	1211,10	79,58	2865,73	4072,42	Carga a mais
51	22-6-01	6:00	22-6-01	12:20	6,33	1217,43	57,17	2922,90	4134,00	Ciclone encravado
52	28-6-01	10:30	28-6-01	11:15	0,75	1218,18	142,17	3065,07	4282,50	Embraiagem do V2 deitou óleo fora
53	6-7-01	23:45	7-7-01	1:10	1,42	1219,60	204,50	3269,57	4487,75	Electrofiltro
54	9-7-01	20:45	10-7-01	13:45	17,00	1236,60	67,58	3337,15	4556,75	Motor principal queimado
55	13-7-01	16:55	13-7-01	17:25	0,50	1237,10	75,17	3412,32	4648,92	Falta de ar na rede, por queda de tensão na sala de comando
56	14-7-01	14:05	14-7-01	14:15	0,17	1237,27	20,67	3432,98	4670,08	Ventilador de tiragem, chamou-se o electricista
57	29-7-01	16:25	29-7-01	21:15	4,83	1242,10	362,17	3795,15	5032,42	Filtro do motor totalmente colmatado
58	29-7-01	21:30	30-7-01	11:15	13,75	1255,85	0,25	3795,40	5037,50	Ciclone encravado
59	3-8-01	7:00	3-8-01	19:10	12,17	1268,02	91,75	3887,15	5143,00	Cadeia de arrastos
60	4-8-01	1:20	4-8-01	3:50	2,50	1270,52	6,17	3893,32	5161,33	Corrente alta no forno
61	4-8-01	14:55	4-8-01	16:50	1,92	1272,43	11,08	3904,40	5174,92	Substituição do aparelho de controlo da velocidade do motor
62	6-8-01	0:55	6-8-01	4:35	3,67	1276,10	32,08	3936,48	5208,92	Pólos auxiliares
63	8-8-01	10:15	8-8-01	22:15	12,00	1288,10	53,67	3990,15	5266,25	Verificação do armário do motor do forno, problemas
64	12-8-01	18:40	14-8-01	21:30	50,83	1338,93	92,42	4082,57	5370,67	Fusível queimado, depois motor não arrancava, foi substituído motor do forno
65	18-8-01	4:30	18-8-01	7:05	2,58	1341,52	79,00	4161,57	5500,50	Falha na comunicação dos autómatos, ficou-se sem comandos
66	20-8-01	2:37	20-8-01	4:05	1,47	1342,98	43,53	4205,10	5546,62	Pico de tensão interno
67	25-8-01	0:35	25-8-01	16:45	16,17	1359,15	116,50	4321,60	5664,58	Electrofiltro
68	25-8-01	17:15	25-8-01	17:45	0,50	1359,65	0,50	4322,10	5681,25	Forno entrou em compressão
69	27-8-01	22:25	28-8-01	20:30	22,08	1381,73	52,67	4374,77	5734,42	Encravamento dos sem-fins
70	29-8-01	2:20	29-8-01	3:50	1,50	1383,23	5,83	4380,60	5762,33	Variação da tensão, provocada pela avaria na linha de alimentação de energia
71	29-8-01	7:20	29-8-01	16:25	9,08	1392,32	3,50	4384,10	5767,33	Avalanche de farinha enche sem-fim
72	30-8-01	20:20	2-9-01	3:20	55,00	1447,32	27,92	4412,02	5804,33	Abriu buraco no pré-calcinado

N(t)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	Obs.
73	4-9-01	8:25	4-9-01	8:45	0,33	1447,65	53,08	4465,10	5912,42	Falta de ar na rede
74	5-9-01	3:15	5-9-01	6:00	2,75	1450,40	18,50	4483,60	5931,25	Queda geral de tensão
75	6-9-01	15:45	6-9-01	18:20	2,58	1452,98	33,75	4517,35	5967,75	Queda geral de tensão
76	17-9-01	15:45	18-9-01	3:35	11,83	1464,82	261,42	4778,77	6231,75	Queda de refractário da tubeira
77	18-9-01	9:55	18-9-01	14:40	4,75	1469,57	6,33	4785,10	6249,92	Paragem do automático da sub-estação B
78	5-10-01	21:20	6-10-01	17:30	20,17	1489,73	414,67	5199,77	6669,33	Ciclone encravado
79	9-10-01	14:25	9-10-01	15:25	1,00	1490,73	68,92	5268,68	6758,42	Falta de ar, avaria no automático
80	11-10-01	6:00	12-10-01	2:00	20,00	1510,73	38,58	5307,27	6798,00	Conservação programada
81	12-10-01	5:50	12-10-01	20:10	14,33	1525,07	3,83	5311,10	6821,83	Queimou gaveta do V1C
82	13-10-01	10:25	13-10-01	13:55	3,50	1528,57	14,25	5325,35	6850,42	Queda geral de tensão
83	19-10-01	4:45	19-10-01	10:10	5,42	1533,98	134,83	5460,18	6988,75	Controlador da cadeia de arrasto do ventilador
84	25-10-01	21:20	25-10-01	21:30	0,17	1534,15	155,17	5615,35	7149,33	Redução do ventilador
85	25-10-01	21:35	26-10-01	7:35	10,00	1544,15	0,08	5615,43	7149,58	Ciclone encravado
86	31-10-01	18:40	1-11-01	9:30	14,83	1558,98	131,08	5746,52	7290,67	Substituir tubeira
87	2-11-01	10:05	2-11-01	18:00	7,92	1566,90	24,58	5771,10	7330,08	Disparou SAS do permutador por ter caído tubo
88	2-11-01	21:15	3-11-01	0:50	3,58	1570,48	3,25	5774,35	7341,25	Problema eléctrico no V1D
89	7-11-01	19:00	9-11-01	14:40	43,67	1614,15	114,17	5888,52	7459,00	Queda parcial da beija do forno
90	9-11-01	23:20	10-11-01	1:10	1,83	1615,98	8,67	5897,18	7511,33	Defeito de pressão do óleo do motor do forno
91	11-11-01	3:55	11-11-01	7:05	3,17	1619,15	26,75	5923,93	7539,92	Pressão baixa do redutor
92	16-11-01	15:15	16-11-01	18:40	3,42	1622,57	128,17	6052,10	7671,25	Encravamento dos dois elevadores de farinha (E8 E9)
93	17-11-01	14:45	17-11-01	16:50	2,08	1624,65	20,08	6072,18	7694,75	Queda de tensão
94	14-12-01	5:40	15-12-01	0:55	19,25	1643,90	636,83	6709,02	8333,67	Limpeza das pás do ventilador do forno
95	15-12-01	5:40	15-12-01	21:55	16,25	1660,15	4,75	6713,77	8357,67	Ciclone encravado
96	16-12-01	19:30	17-12-01	8:35	13,08	1673,23	21,58	6735,35	8395,50	Substituição da tubeira
97	24-12-01	9:50	24-12-01	21:50	12,00	1685,23	169,25	6904,60	8577,83	Vibração na turbina do ventilador do forno, intervenção
98	10-1-02	14:15	12-1-02	10:30	44,25	1729,48	400,42	7305,02	8990,25	Ciclone encravado
99	12-1-02	11:00	12-1-02	11:20	0,33	1729,82	0,50	7305,52	9035,00	Encravamento do doseador
100	21-1-02	7:00	23-1-02	2:10	43,17	1772,98	211,67	7517,18	9247,00	Electrofiltro
101	23-1-02	2:30	23-1-02	3:40	1,17	1774,15	0,33	7517,52	9290,50	Encravamento do doseador e caleira
102	13-2-02	11:00	14-2-02	12:55	25,92	1800,07	511,33	8028,85	9803,00	Intervenção no pente do britador do arrefecedor
103	16-2-02	8:15	16-2-02	11:30	3,25	1803,32	43,33	8072,18	9872,25	O P'fister entrou em defeito e não arrancava
104	20-2-02	0:50	20-2-02	1:05	0,25	1803,57	85,33	8157,52	9960,83	Encravamento ciclone
105	3-3-02	8:05	3-3-02	12:05	4,00	1807,57	271,00	8428,52	10232,08	Queda de tensão
106	3-3-02	12:05	4-3-02	15:20	27,25	1834,82	0,50	8428,52	10236,08	Queda de refractário da tubeira do queimador
107	5-3-02	6:50	5-3-02	8:40	1,83	1836,65	15,00	8444,02	10278,83	Corte geral de energia
108	7-3-02	9:35	8-3-02	8:55	23,33	1859,98	48,92	8492,93	10329,58	Conservação da chumaceira do ventilador do forno, lado do ataque
109	8-3-02	19:05	8-3-02	22:15	3,17	1863,15	10,17	8503,10	10363,08	Problema na válvula 411
110	11-3-02	21:00	11-3-02	21:25	0,42	1863,57	70,75	8573,85	10437,00	Problemas de tensão
111	11-3-02	21:30	12-3-02	9:25	11,92	1875,48	0,08	8573,93	10437,50	Ciclone encravado
112	12-3-02	12:40	12-3-02	15:15	2,58	1878,07	3,25	8577,18	10452,67	Temperatura alta na chumaceira
113	12-3-02	15:20	12-3-02	16:25	1,08	1879,15	0,08	8577,27	10455,33	Ciclone encravado
114	15-3-02	21:10	16-3-02	0:55	3,75	1882,90	76,75	8654,02	10533,17	Tromba de água provoca queda de tensão
115	16-3-02	6:15	16-3-02	7:00	0,75	1883,65	5,33	8659,35	10542,25	Ciclone encravado
116	16-3-02	8:50	16-3-02	14:00	5,17	1888,82	1,83	8661,18	10544,83	Ciclone encravado
117	18-3-02	11:00	20-3-02	17:00	54,00	1942,82	45,00	8706,18	10595,00	Reparação ciclone e reparação do arrefecedor
118	20-3-02	17:45	20-3-02	17:50	0,08	1942,90	0,75	8706,93	10649,75	Rebentaram dois flexíveis dos queimadores
119	23-3-02	1:05	23-3-02	15:35	14,50	1957,40	55,25	8762,18	10705,08	Desengatou a cadeia de arrasto, partiu-se elo
120	25-3-02	10:50	25-3-02	11:05	0,25	1957,65	43,25	8805,43	10762,83	Paragem do ventilador de tiragem do forno
121	25-3-02	11:08	25-3-02	14:30	3,37	1961,02	0,05	8805,48	10763,13	Ciclone encravado
122	1-4-02	1:30	2-4-02	0:45	23,25	1984,27	155,00	8960,48	10921,50	Queda de tensão
123	2-4-02	1:35	2-4-02	3:10	1,58	1985,85	0,83	8961,32	10945,58	Ciclone encravado
124	2-4-02	4:05	2-4-02	4:35	0,50	1986,35	0,92	8962,23	10948,08	Doseadores com defeito, não metiam farinha
125	10-4-02	11:05	10-4-02	11:35	0,50	1986,85	198,50	9160,73	11147,08	Paragem do forno sem motivo aparente
126	15-4-02	9:20	16-4-02	3:35	18,25	2005,10	117,75	9278,48	11265,33	Substituir tubeira
127	22-4-02	9:15	22-4-02	9:50	0,58	2005,68	149,67	9428,15	11433,25	Forno parou sem motivo aparente
128	23-4-02	7:00	23-4-02	19:15	12,25	2017,93	21,17	9449,32	11455,00	Problemas no automático da sub B1
129	24-4-02	9:40	24-4-02	10:40	1,00	2018,93	14,42	9463,73	11481,67	Ciclone encravado
130	1-5-02	4:10	26-5-02	1:00	596,83	2615,77	161,50	9625,23	11644,17	Grande Reparação
131	27-5-02	0:45	27-5-02	2:20	1,58	2617,35	23,75	9648,98	12264,75	Doseador
132	27-5-02	3:10	27-5-02	5:50	2,67	2620,02	0,83	9649,82	12267,17	Disparo na sub-estação
133	27-5-02	6:55	27-5-02	7:40	0,75	2620,77	1,08	9650,90	12270,92	Forno parou sem motivo aparente
134	27-5-02	9:15	27-5-02	11:00	1,75	2622,52	1,58	9652,48	12273,25	Paragem do doseador
135	27-5-02	15:00	27-5-02	22:05	7,08	2629,60	4,00	9656,48	12279,00	Paragem do ventilador
136	31-5-02	0:40	31-5-02	7:05	6,42	2636,02	74,58	9731,07	12360,67	Falta de farinha, problemas no separador dinâmico da moagem de farinha
137	1-6-02	21:10	2-6-02	2:20	5,17	2641,18	38,08	9769,15	12405,17	Ciclone
138	2-6-02	21:00	2-6-02	22:30	1,50	2642,68	18,67	9787,82	12429,00	Subiu a temperatura da chumaceira do forno, anel de matéria
139	2-6-02	23:40	3-6-02	1:00	1,33	2644,02	1,17	9788,98	12431,67	Subiu a temperatura da chumaceira do forno, anel de matéria
140	3-6-02	2:20	3-6-02	4:10	1,83	2645,85	1,33	9790,32	12434,33	Subiu a temperatura da chumaceira do forno, anel de matéria
141	3-6-02	6:00	3-6-02	11:05	5,08	2650,93	1,83	9792,15	12438,00	Subiu a temperatura da chumaceira do forno, anel de matéria
142	3-6-02	16:20	5-6-02	18:30	50,17	2701,10	5,25	9797,40	12448,33	Queda de refractário do forno
143	10-6-02	23:25	11-6-02	5:20	5,92	2707,02	124,92	9922,32	12623,42	Queda de tubo no interior encrava forno, problemas na beija
144	12-6-02	7:25	12-6-02	11:05	3,67	2710,68	26,08	9948,40	12655,42	Problemas no doseador de combustível sólido
145	17-6-02	9:50	17-6-02	22:45	12,92	2723,60	118,75	10067,15	12777,83	Intervenção na grelha 2 do arrefecedor



N(t)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	Obs.
146	20-6-02	17:55	20-6-02	18:15	0,33	2723,93	67,17	10134,32	12857,92	Paragem do ventilador do filtro de manga, por vibração
147	24-6-02	11:00	24-6-02	22:50	11,83	2735,77	88,75	10223,07	12947,00	Caiu refractário do queimador
148	27-6-02	8:25	27-6-02	10:20	1,92	2737,68	57,58	10280,65	13016,42	Ciclone encravado
149	2-7-02	17:00	2-7-02	18:40	1,67	2739,35	126,67	10407,32	13145,00	Fábrica parou por causa de avaria eléctrica na cela do moinho desbastador
150	7-7-02	12:00	7-7-02	12:05	0,08	2739,43	113,33	10520,65	13260,00	Defeito eléctrico na lubrificação da coroa
151	9-7-02	17:20	9-7-02	23:15	5,92	2745,35	53,25	10573,90	13313,33	Falta de farinha no forno
152	9-7-02	23:20	10-7-02	12:43	13,38	2758,73	0,08	10573,98	13319,33	Ciclone encravado
153	10-7-02	14:25	11-7-02	2:50	12,42	2771,15	1,70	10575,68	13334,42	Grelha de arrefecedor partida
154	11-7-02	2:53	11-7-02	7:00	4,12	2775,27	0,05	10575,73	13346,88	Caudal de óleo baixo no redutor do motor principal do forno
155	15-7-02	12:17	15-7-02	12:20	0,05	2775,32	101,28	10677,02	13452,28	Defeito eléctrico na lubrificação da coroa
156	15-7-02	14:04	15-7-02	14:05	0,02	2775,33	1,73	10678,75	13454,07	Defeito eléctrico na lubrificação da coroa
157	15-7-02	15:55	15-7-02	16:55	1,00	2776,33	1,83	10680,58	13455,92	Caudal de óleo baixo no redutor do motor principal do forno
158	16-7-02	14:00	16-7-02	14:15	0,25	2776,58	21,08	10701,67	13478,00	Defeito eléctrico na lubrificação da coroa
159	16-7-02	16:40	16-7-02	16:55	0,25	2776,83	2,42	10704,08	13480,67	Defeito eléctrico na lubrificação da coroa
160	16-7-02	18:30	16-7-02	19:05	0,58	2777,42	1,58	10705,67	13482,50	Defeito eléctrico na lubrificação da coroa
161	17-7-02	11:00	17-7-02	22:15	11,25	2788,67	15,92	10721,58	13499,00	Avaria mecânica na válvula reguladora da farinha do doseador do forno
162	21-7-02	4:50	21-7-02	6:20	1,50	2790,17	78,58	10800,17	13588,83	Caudal de óleo baixo no redutor do motor principal do forno
163	21-7-02	6:21	21-7-02	9:30	3,15	2793,32	0,02	10800,18	13590,35	Ciclone encravado
164	21-7-02	21:50	21-7-02	21:55	0,08	2793,40	12,33	10812,52	13605,83	Ciclone encravado
165	22-7-02	4:50	22-7-02	5:10	0,33	2793,73	6,92	10819,43	13612,83	Queda de tensão
166	27-7-02	0:27	27-7-02	10:30	10,05	2803,78	115,28	10934,72	13728,45	Ciclone encravado
167	29-7-02	9:25	30-7-02	3:35	18,17	2821,95	46,92	10981,63	13785,42	Temperatura alta na chumaceira
168	30-7-02	7:10	31-7-02	13:25	30,25	2852,20	3,58	10985,22	13807,17	Temperatura alta na chumaceira
169	31-7-02	14:15	1-8-02	4:30	14,25	2866,45	0,83	10986,05	13838,25	Temperatura alta na chumaceira
170	2-8-02	8:20	2-8-02	11:00	2,67	2869,12	27,83	11013,88	13880,33	Temperatura alta na chumaceira
171	6-8-02	17:45	7-8-02	0:35	6,83	2875,95	102,75	11116,63	13985,75	Ciclone
172	7-8-02	3:55	8-8-02	1:20	21,42	2897,37	3,33	11119,97	13995,92	Ventilador de tiragem, defeito eléctrico
173	9-8-02	14:20	9-8-02	18:50	4,50	2901,87	37,00	11156,97	14054,33	Problema na sub-estação C
174	15-8-02	20:15	16-8-02	1:10	4,92	2906,78	145,42	11302,38	14204,25	Ciclone encravado
175	16-8-02	8:30	16-8-02	9:05	0,58	2907,37	7,33	11309,72	14216,50	Elevador encravado
176	16-8-02	18:45	17-8-02	5:55	11,17	2918,53	9,67	11319,38	14226,75	Falta de farinha
177	18-8-02	23:00	19-8-02	0:20	1,33	2919,87	41,08	11360,47	14279,00	Ciclone encravado
178	21-8-02	9:20	21-8-02	21:55	12,58	2932,45	57,00	11417,47	14337,33	Falta de farinha
179	22-8-02	14:40	22-8-02	16:45	2,08	2934,53	16,75	11434,22	14366,67	Pico de tensão
180	23-8-02	3:15	23-8-02	3:30	0,25	2934,78	10,50	11444,72	14379,25	Ciclone
181	25-8-02	15:50	26-8-02	2:20	10,50	2945,28	60,33	11505,05	14439,83	Temperatura alta na chumaceira
182	26-8-02	2:25	26-8-02	8:45	6,33	2951,62	0,08	11505,13	14450,42	Ciclone encravado
183	27-8-02	19:00	28-8-02	0:40	5,67	2957,28	34,25	11539,38	14491,00	Ciclone encravado
184	30-8-02	6:45	30-8-02	7:10	0,42	2957,70	54,08	11593,47	14550,75	Pico de tensão interno
185	30-8-02	7:15	30-8-02	17:50	10,58	2968,28	0,08	11593,55	14551,25	Ciclone encravado
186	30-8-02	18:30	30-8-02	20:50	2,33	2970,62	0,67	11594,22	14562,50	Ciclone encravado
187	1-9-02	10:30	1-9-02	10:50	0,33	2970,95	37,67	11631,88	14602,50	Avaria eléctrica e mecânica no Phister's do forno
188	2-9-02	9:15	2-9-02	9:30	0,25	2971,20	22,42	11654,30	14625,25	Defeito no ventilador do forno
189	2-9-02	15:30	2-9-02	18:10	2,67	2973,87	6,00	11660,30	14631,50	Defeito de marcha do Phister's do pré-calcinador
190	2-9-02	18:15	3-9-02	1:45	7,50	2981,37	0,08	11660,38	14634,25	Ciclone encravado
191	3-9-02	2:05	3-9-02	2:40	0,58	2981,95	0,33	11660,72	14642,08	Ciclone encravado
192	9-9-02	0:00	9-9-02	3:15	3,25	2985,20	141,33	11802,05	14784,00	Picos de tensão
193	9-9-02	3:20	9-9-02	4:30	1,17	2986,37	0,08	11802,13	14787,33	Encravamento por queda de crosta
194	9-9-02	4:37	9-9-02	10:00	5,38	2991,75	0,12	11802,25	14788,62	Ciclone encravado
195	11-9-02	17:35	11-9-02	21:00	3,42	2995,17	55,58	11857,83	14849,58	Ciclone encravado
196	14-9-02	10:10	15-9-02	0:55	14,75	3009,92	61,17	11919,00	14914,17	Ciclones encravado
197	15-9-02	3:15	15-9-02	4:07	0,87	3010,78	2,33	11921,33	14931,25	Picos de tensão
198	15-9-02	4:10	15-9-02	4:40	0,50	3011,28	0,05	11921,38	14932,17	Ciclone encravado
199	15-9-02	5:05	15-9-02	6:40	1,58	3012,87	0,42	11921,80	14933,08	Ciclone encravado
200	16-9-02	2:35	16-9-02	5:05	2,50	3015,37	19,92	11941,72	14954,58	Ventilador de tiragem parou por causa do mau tempo
201	16-9-02	5:10	16-9-02	6:00	0,83	3016,20	0,08	11941,80	14957,17	Ciclones encravado
202	16-9-02	6:20	16-9-02	6:45	0,42	3016,62	0,33	11942,13	14958,33	Parou ventilador de tiragem
203	2-10-02	21:15	3-10-02	6:00	8,75	3025,37	398,50	12340,63	15357,25	Ciclone encravado
204	3-10-02	6:07	3-10-02	10:15	4,13	3029,50	0,12	12340,75	15366,12	Ciclone encravado
205	5-10-02	17:00	5-10-02	17:30	0,50	3030,00	54,75	12395,50	15425,00	Encravamento na caída da cadeia de arrasto do elevador
206	12-10-02	10:55	12-10-02	12:00	1,08	3031,08	161,42	12556,92	15586,92	Corrente subiu repentinamente
207	25-10-02	4:45	26-10-02	9:35	28,83	3059,92	304,75	12861,67	15892,75	Mudar tubeira
208	30-10-02	17:20	30-10-02	17:45	0,42	3060,33	103,75	12965,42	16025,33	Defeito eléctrico no ventilador da caleira do produto acabado
209	2-11-02	14:25	4-11-02	4:25	38,00	3098,33	68,67	13034,08	16094,42	Ciclone encravado
210	15-11-02	11:30	15-11-02	14:55	3,42	3101,75	271,08	13305,17	16403,50	Tubo caído no permutador do arrefecedor
211	22-11-02	14:50	22-11-02	17:45	2,92	3104,67	167,92	13473,08	16574,83	Ciclone encravado
212	24-11-02	0:55	24-11-02	2:45	1,83	3106,50	31,17	13504,25	16608,92	Corte de corrente
213	24-11-02	3:40	24-11-02	5:05	1,42	3107,92	0,92	13505,17	16611,67	Corte de corrente
214	25-11-02	12:45	25-11-02	17:50	5,08	3113,00	31,67	13536,83	16644,75	Paragem do doseador, motor queimado da válvula
215	29-11-02	7:55	29-11-02	9:45	1,83	3114,83	86,08	13622,92	16735,92	a fabrica parou
216	4-12-02	18:07	4-12-02	18:50	0,72	3115,55	128,37	13751,28	16866,12	Ciclone encravado
217	8-12-02	5:30	8-12-02	5:45	0,25	3115,80	82,67	13833,95	16949,50	Ciclone encravado
218	8-12-02	7:40	8-12-02	8:35	0,92	3116,72	1,92	13835,87	16951,67	Ciclone encravado

N(t)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	Obs.
219	8-12-02	9:15	9-12-02	5:00	19,75	3136,47	0,67	13836,53	16953,25	Ciclone encravado
220	10-12-02	1:20	11-12-02	7:20	30,00	3166,47	20,33	13856,87	16993,33	Greve geral
221	11-12-02	16:38	12-12-02	3:40	11,03	3177,50	9,30	13866,17	17032,63	Temperatura alta na chumaceira do lado do ataque do ventilador do forno
222	12-12-02	3:45	12-12-02	9:25	5,67	3183,17	0,08	13866,25	17043,75	Ciclone
223	18-12-02	1:40	18-12-02	4:30	2,83	3186,00	136,25	14002,50	17185,67	Caiu tubo do permutador do arrefecedor e prendeu sem-fim
224	18-12-02	5:30	18-12-02	7:10	1,67	3187,67	1,00	14003,50	17189,50	Prisão do sem-fim do permutador do arrefecedor
225	18-12-02	9:35	18-12-02	13:10	3,58	3191,25	2,42	14005,92	17193,58	Ciclone encravado
226	18-12-02	15:20	19-12-02	10:00	18,67	3209,92	2,17	14008,08	17199,33	Ciclone encravado
227	19-12-02	10:45	19-12-02	11:25	0,67	3210,58	0,75	14008,83	17218,75	Ciclone encravado
228	26-12-02	12:35	26-12-02	14:45	2,17	3212,75	169,17	14178,00	17388,58	Ciclone encravado
229	28-12-02	8:45	29-12-02	20:00	35,25	3248,00	42,00	14220,00	17432,75	Paragem para montagem da beija
230	31-12-02	21:35	31-12-02	22:00	0,42	3248,42	49,58	14269,58	17517,58	Partiu-se o fusível mecânico da grelha do arrefecedor
231	1-1-03	8:20	1-1-03	16:35	8,25	3256,67	10,33	14279,92	17528,33	Ciclone encravado
232	8-1-03	11:35	8-1-03	20:50	9,25	3265,92	163,00	14442,92	17699,58	Ciclone encravado
233	8-1-03	21:30	9-1-03	0:45	3,25	3269,17	0,67	14443,58	17709,50	Ciclone encravado
234	9-1-03	0:50	9-1-03	2:35	1,75	3270,92	0,08	14443,67	17712,83	Encravou o tubo de descarga do ciclone, entre o clapet e a entrada da caixa de fumos
235	9-1-03	18:40	10-1-03	1:10	6,50	3277,42	16,08	14459,75	17730,67	Ciclone encravado
236	13-1-03	22:50	14-1-03	9:50	11,00	3288,42	93,67	14553,42	17830,83	Ciclone encravado
237	14-1-03	21:25	17-1-03	17:00	67,58	3356,00	11,58	14565,00	17853,42	Ciclone encravado
238	17-1-03	17:10	17-1-03	17:30	0,33	3356,33	0,17	14565,17	17921,17	Ciclone encravado
239	17-1-03	19:25	18-1-03	10:10	14,75	3371,08	1,92	14567,08	17923,42	Ciclone encravado
240	20-1-03	13:55	20-1-03	14:10	0,25	3371,33	51,75	14618,83	17989,92	Falta de tensão
241	22-1-03	10:30	22-1-03	11:15	0,75	3372,08	44,33	14663,17	18034,50	Paragem do ventilador de tiragem, intervenção mecânica
242	23-1-03	3:55	23-1-03	4:30	0,58	3372,67	16,67	14679,83	18051,92	Ciclone encravado
243	23-1-03	4:55	23-1-03	7:20	2,42	3375,08	0,42	14680,25	18052,92	Ciclone encravado
244	25-1-03	19:30	25-1-03	22:00	2,50	3377,58	60,17	14740,42	18115,50	Defeito eléctrico do sem-fim do permutador, caiu tubo no sem-fim
245	3-2-03	9:55	4-2-03	0:55	15,00	3392,58	203,92	14944,33	18321,92	Limpeza da turbina do ventilador de tiragem do forno
246	15-2-03	13:04	15-2-03	13:56	0,87	3393,45	276,15	15220,48	18613,07	Paragem do PT2
247	15-2-03	14:10	15-2-03	21:00	6,83	3400,28	0,23	15220,72	18614,17	Ciclone encravado
248	16-2-03	14:33	16-2-03	19:40	5,12	3405,40	17,55	15238,27	18638,55	Parou o forno sem se saber o motivo e não arrancava
249	19-2-03	3:30	19-2-03	11:00	7,50	3412,90	55,83	15294,10	18699,50	Falta de farinha
250	28-2-03	8:35	28-2-03	10:55	2,33	3415,23	213,58	15507,68	18920,58	Transformador 1 provoca paragem da fábrica
251	28-2-03	11:00	28-2-03	11:30	0,50	3415,73	0,08	15507,77	18923,00	Ciclone encravado
252	2-3-03	21:45	3-3-03	1:15	3,50	3419,23	58,25	15566,02	18981,75	Ciclone encravado
253	3-3-03	1:23	3-3-03	20:00	18,62	3437,85	0,13	15566,15	18985,38	Ciclone encravado
254	4-3-03	12:26	4-3-03	14:15	1,82	3439,67	16,43	15582,58	19020,43	Ciclone encravado
255	11-3-03	19:00	12-3-03	5:50	10,83	3450,50	172,75	15755,33	19195,00	Ciclone encravado
256	18-3-03	0:30	19-3-03	10:00	33,50	3484,00	138,67	15894,00	19344,50	Enchimento repentino na câmara 1 do arrefecedor
257	19-3-03	17:55	19-3-03	18:45	0,83	3484,83	7,92	15901,92	19385,92	Caiu tubos no permutador
258	20-3-03	16:05	20-3-03	16:35	0,50	3485,33	21,33	15923,25	19408,08	Encravamento do air-lift
259	22-3-03	18:20	22-3-03	20:10	1,83	3487,17	49,75	15973,00	19458,33	Ciclone
260	3-4-03	23:40	4-4-03	6:20	6,67	3493,83	291,50	16264,50	19751,67	Ciclone
261	5-4-03	4:10	5-4-03	21:40	17,50	3511,33	21,83	16286,33	19780,17	Buraco no tecto do arrefecedor
262	15-4-03	13:20	15-4-03	13:55	0,58	3511,92	231,67	16518,00	20029,33	Ciclone
263	27-4-03	1:05	27-4-03	11:35	10,50	3522,42	275,17	16793,17	20305,08	Tubo caído no permutador do arrefecedor
264	27-4-03	11:40	27-4-03	16:55	5,25	3527,67	0,48	16793,25	20315,67	Ciclone
265	27-4-03	19:20	27-4-03	22:35	3,25	3530,92	2,42	16795,67	20323,33	Caíram tubos no permutador
266	29-4-03	21:55	30-4-03	0:50	2,92	3533,83	47,33	16843,00	20373,92	Caíram tubos no permutador
267	1-5-03	6:20	31-5-03	11:55	725,58	4259,42	29,50	16872,50	20406,33	Grande reparação
268	12-6-03	1:10	12-6-03	6:30	5,33	4264,75	277,25	17149,75	21409,17	Pico de tensão provocou vários problemas
269	12-6-03	7:35	12-6-03	10:20	2,75	4267,50	1,08	17150,83	21415,58	Queda de tijolo junto à beija
270	12-6-03	17:30	14-6-03	1:55	32,42	4299,92	7,17	17158,00	21425,50	Conservação da chumaceira K do forno, chumaceira de um dos roletes do forno
271	1-7-03	4:10	1-7-03	12:45	8,58	4308,50	410,25	17568,25	21868,17	Partiu-se a grelha 2 do arrefecedor
272	9-7-03	22:30	10-7-03	6:45	8,25	4316,75	201,75	17770,00	22078,50	Problemas com a abertura da válvula para o camião
273	10-7-03	15:25	10-7-03	17:20	1,92	4318,67	8,67	17778,67	22095,42	Forno parou sem motivo aparente
274	11-7-03	18:30	13-7-03	13:20	42,83	4361,50	25,17	17803,83	22122,50	Problemas na beija do forno
275	14-7-03	3:55	14-7-03	5:20	1,42	4362,92	14,58	17818,42	22179,92	Paragem do ventilador de tiragem
276	14-7-03	5:25	14-7-03	9:40	4,25	4367,17	0,08	17818,50	22181,42	Ciclone encravado
277	14-7-03	21:20	15-7-03	0:20	3,00	4370,17	11,67	17830,17	22197,33	Vibração no ventilador de tiragem
278	18-7-03	1:35	18-7-03	8:25	6,83	4377,00	73,25	17903,42	22273,58	por temperatura muito alta na chumaceira K do rolete
279	24-7-03	14:05	24-7-03	19:45	5,67	4382,67	149,67	18053,08	22430,08	Ciclone encravado
280	24-7-03	19:50	25-7-03	9:00	13,17	4395,83	0,08	18053,17	22435,83	Substituir tubeira, porque caiu refractário
281	31-7-03	20:00	1-8-03	1:40	5,67	4401,50	155,00	18208,17	22604,00	Ciclone encravado
282	2-8-03	9:10	2-8-03	10:10	1,00	4402,50	31,50	18239,67	22641,17	Queda de tensão
283	2-8-03	14:25	2-8-03	17:40	3,25	4405,75	4,25	18243,92	22646,42	Queda de tensão
284	3-8-03	1:35	3-8-03	5:55	4,33	4410,08	7,92	18251,83	22657,58	Temperatura alta na chumaceira F do rolete
285	3-8-03	15:25	3-8-03	16:25	1,00	4411,08	9,50	18261,33	22671,42	Pico de tensão
286	13-8-03	12:15	14-8-03	9:20	21,08	4432,17	235,83	18497,17	22908,25	Encravamento na caída do arrefecedor
287	14-8-03	11:15	14-8-03	16:30	5,25	4437,42	1,92	18499,08	22931,25	Queda de tensão
288	21-8-03	7:00	21-8-03	7:30	0,50	4437,92	158,50	18657,58	23095,00	Gestão de energia
289	23-8-03	3:05	23-8-03	3:20	0,25	4438,17	43,58	18701,17	23139,08	Oscilação na corrente eléctrica
290	23-8-03	6:25	23-8-03	6:40	0,25	4438,42	3,08	18704,25	23142,42	Oscilação na corrente eléctrica

N(t)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	Obs.
291	24-8-03	2:17	24-8-03	3:25	1,13	4439,55	19,62	18723,87	23162,28	Queda de tensão
292	24-8-03	6:50	24-8-03	9:10	2,33	4441,88	3,42	18727,28	23166,83	Queda de tensão
293	29-8-03	19:26	30-8-03	0:30	5,07	4446,95	130,27	18857,55	23299,43	Falta de comando dos <i>Phister's</i> da tubeira do forno
294	3-9-03	10:25	4-9-03	8:45	22,33	4469,28	105,92	18963,47	23410,42	Ciclone encravado
295	12-9-03	15:08	12-9-03	18:20	3,20	4472,48	198,38	19161,85	23631,13	Pico de tensão
296	15-9-03	21:30	16-9-03	1:05	3,58	4476,07	75,17	19237,02	23709,50	Ciclone encravado
297	16-9-03	21:36	18-9-03	1:25	27,82	4503,88	20,52	19257,53	23733,60	Grelha do arrefecedor partida
298	19-9-03	13:40	19-9-03	14:25	0,75	4504,63	36,25	19293,78	23797,67	Queda de tensão
299	19-9-03	15:15	19-9-03	15:45	0,50	4505,13	0,83	19294,62	23799,25	Queda de tensão
300	20-9-03	4:20	20-9-03	10:20	6,00	4511,13	12,58	19307,20	23812,33	Queda de tensão
301	26-9-03	2:30	26-9-03	22:50	20,33	4531,47	136,17	19443,37	23954,50	Ciclone encravado
302	27-9-03	11:10	27-9-03	17:30	6,33	4537,80	12,33	19455,70	23987,17	Ciclone encravado
303	28-9-03	8:40	28-9-03	10:40	2,00	4539,80	15,17	19470,87	24008,67	Ciclone encravado
304	29-9-03	8:10	29-9-03	14:13	6,05	4545,85	21,50	19492,37	24032,17	Encravamento no SAS do permutador
305	29-9-03	14:17	29-9-03	19:40	5,38	4551,23	0,07	19492,43	24038,28	Ciclone encravado
306	6-10-03	13:47	7-10-03	8:50	19,05	4570,28	162,12	19654,55	24205,78	Ciclone encravado
307	16-10-03	1:50	16-10-03	21:00	19,17	4589,45	209,00	19863,55	24433,83	Parou o motor principal
308	17-10-03	17:40	17-10-03	18:45	1,08	4590,53	20,67	19884,22	24473,67	Ciclone encravado
309	21-10-03	5:00	21-10-03	21:25	16,42	4606,95	82,25	19966,47	24557,00	Ciclone encravado
310	24-10-03	12:15	24-10-03	20:00	7,75	4614,70	62,83	20029,30	24636,25	Ficou-se sem comandos
311	25-10-03	3:45	25-10-03	5:10	1,42	4616,12	7,75	20037,05	24651,75	Pico de tensão
312	25-10-03	5:17	26-10-03	20:05	38,80	4654,92	0,12	20037,17	24653,28	Ciclone encravado
313	27-10-03	9:46	27-10-03	14:45	4,98	4659,90	13,68	20050,85	24705,77	Sem comandos
314	27-10-03	19:15	28-10-03	1:00	5,75	4665,65	4,50	20055,35	24715,25	Ciclone encravado
315	28-10-03	13:15	28-10-03	18:20	5,08	4670,73	12,25	20067,60	24733,25	Ciclone encravado
316	3-11-03	15:15	4-11-03	1:40	10,42	4681,15	140,92	20208,52	24879,25	Ciclone encravado
317	7-11-03	9:00	7-11-03	10:55	1,92	4683,07	79,33	20287,85	24969,00	Disparo do PT4
318	7-11-03	11:00	7-11-03	14:40	3,67	4686,73	0,08	20287,93	24971,00	Disparo do PT5
319	12-11-03	1:30	12-11-03	2:15	0,75	4687,48	106,83	20394,77	25081,50	Ciclone encravado
320	12-11-03	16:15	12-11-03	16:30	0,25	4687,73	14,00	20408,77	25096,25	Problemas mecânicos na grelha do arrefecedor, foi substituído fusível
321	12-11-03	16:33	13-11-03	11:45	19,20	4706,93	0,05	20408,82	25096,55	Ciclone encravado
322	20-11-03	0:10	20-11-03	9:25	9,25	4716,18	156,42	20565,23	25272,17	Ciclone encravado
323	22-11-03	7:55	22-11-03	16:50	8,92	4725,10	46,50	20611,73	25327,92	Ciclone encravado
324	23-11-03	12:54	23-11-03	16:45	3,85	4728,95	20,07	20631,80	25356,90	Pico de tensão parou fábrica
325	26-11-03	5:16	26-11-03	13:55	8,65	4737,60	60,52	20692,32	25421,27	Caiu refractário do queimador
326	4-12-03	23:25	5-12-03	3:05	3,67	4741,27	201,50	20893,82	25631,42	Paragem do motor do forno
327	5-12-03	23:30	6-12-03	1:20	1,83	4743,10	20,42	20914,23	25655,50	Oscilação na corrente eléctrica
328	6-12-03	9:00	6-12-03	10:40	1,67	4744,77	7,67	20921,90	25665,00	Queda de tensão
329	6-12-03	10:55	6-12-03	22:15	11,33	4756,10	0,25	20922,15	25666,92	Ciclone
330	7-12-03	7:00	7-12-03	8:55	1,92	4758,02	8,75	20930,90	25687,00	Pico de tensão
331	8-12-03	2:25	8-12-03	4:00	1,58	4759,60	17,50	20948,40	25706,42	Problemas vario, elevador, sem-fim, filtro, electrofiltro
332	13-12-03	1:03	13-12-03	3:35	2,53	4762,13	117,05	21065,45	25825,05	Ciclones encravado
333	17-12-03	19:25	17-12-03	23:20	3,92	4766,05	111,83	21177,28	25939,42	Ciclones encravado
334	18-12-03	1:05	18-12-03	4:00	2,92	4768,97	1,75	21179,03	25945,08	Ciclones encravado
335	19-12-03	2:00	19-12-03	11:20	9,33	4778,30	22,00	21201,03	25970,00	Ciclones encravado
336	19-12-03	11:25	21-12-03	1:35	38,17	4816,47	0,08	21201,12	25979,42	Detectou-se falta de refractário
337	21-12-03	3:00	21-12-03	4:20	1,33	4817,80	1,42	21202,53	26019,00	Avaria no pré-calcinador
338	21-12-03	8:30	21-12-03	10:40	2,17	4819,97	4,17	21206,70	26024,50	Problemas na beica do forno
339	21-12-03	15:35	21-12-03	18:35	3,00	4822,97	4,92	21211,62	26031,58	Queda de refractário na beica do forno
340	22-12-03	17:41	23-12-03	1:45	8,07	4831,03	23,10	21234,72	26057,68	Ciclone encravado
341	24-12-03	4:35	24-12-03	9:00	4,42	4835,45	26,83	21261,55	26092,58	Ciclone encravado
342	26-12-03	10:05	26-12-03	10:20	0,25	4835,70	49,08	21310,63	26146,08	Falha no fornecimento de energia
343	26-12-03	10:25	26-12-03	17:10	6,75	4842,45	0,08	21310,72	26146,42	Ciclones encravado
344	27-12-03	4:25	28-12-03	0:40	20,25	4862,70	11,25	21321,97	26164,42	Placa partida na grelha do arrefecedor
345	28-12-03	10:25	28-12-03	11:15	0,83	4863,53	9,75	21331,72	26194,42	Ciclone encravado
346	1-1-04	0:00	-	-	-	4863,53	84,75	21416,47	26280,00	Fim do Estudo

## **ANEXO III – Dados Seleccionados**

### **III.1. Introdução**

Uma vez que alguns dos registos encontrados não se enquadram no âmbito do estudo a efectuar, foi feita uma selecção dos dados que importam ao referido estudo. Embora se tenha registado, como interrupções do sistema, alguns dos dados dizem respeito a causas que não contribuem para a não fiabilidade dos equipamentos e sistema. Logo não foram tomados em consideração (Exemplo: paragens programadas, gestão de stock, falta de farinha, etc.).

O presente anexo apresenta a listagem dos dados seleccionados segundo o critério atrás referido e foram agrupados em quatro grupos diferentes, isto é, quatro grupos de dados correspondentes à ocorrência de falhas entre grandes reparações (GP).

Assim, o primeiro grupo de dados corresponde ao período desde o início do ano de 2001 até à primeira GP, seguindo-se o segundo período da primeira GP à segunda GP, o terceiro período da segunda GP à terceira GP, e por fim o quarto período da terceira GP até ao fim do ano de 2003.

### **III.2. Apresentação dos Dados**

Na fase de recolha de dados, foi considerada uma lista das causas de paragem do equipamento (forno), criada e usada pelo departamento de estatística do CPL para a ordenação dos registos que realizam. Esta informação, serviu na fase inicial deste trabalho, como guia para distinguir e agrupar os diferentes tipos de falha e causas das ocorrências registadas. No entanto, após uma segunda análise, foram seleccionadas as causas significativas ao estudo da disponibilidade do sistema.

O quadro III.1 apresentada uma lista codificada das causas de paragem do forno, seleccionadas.

Quadro III.1 – Lista codificada das causas de paragem do forno em estudo

Código	Causa de Paragem do Forno
F01	Falha de Fornecimento de Energia Eléctrica
F02	Falta de Água
F03	Falta de Ar Comprimido
F04	Sub-Estação/Sala Eléctrica
F05	Tensão de Comando e Instrumentação
F06	Circuito do Fuel
F07	Moagem do Combustível Sólido
F08	Filtro de Mangas de Processo, Despoeiramento
F09	Electrofiltro, Despoeiramento
F10	Torre de Condicionamento, Despoeiramento
F11	Transportador Metálico
F12	Transportador de Correia
F13	Elevador
F14	Caleira Porosa (inclui ventilador e filtros de
F15	Doseadores e Pesadores
F16	Analizador de Gases "on-line"
F17	Britador de Clínquer
F18	Moinho/Separador
F19	Forno
F20	Arrefecedor
F21	Ventilador de Tiragem do Processo
F22	Lubrificação
F23	Sistemas de Transmissão (reductores, roletes,...)
F24	Disparo do Motor Principal
F25	Encravamento/Limpeza/Inspeção da Instalação
F26	Encravamento Ciclones/Câmara de Fumos
F27	Refractário

No quadro III.2 são identificados os acrónimos contidos nos quadros dos dados seleccionados.

Quadro III.2 – Acrónimos dos quadros de dados em estudo

N(t)	Ordem Cronológica das Falhas
DP	Data de Paragem do Forno
HP	Hora de Paragem do Forno
DA	Data de Arranque do Forno
HA	Hora de Arranque do Forno
TR	Tempo de Reparação da Falha (horas)
$\Sigma$ TR	Somatório dos Tempos de Reparação da Falhas (horas)
TBF	Tempo de Bom Funcionamento Entre Falhas (horas)
$\Sigma$ TBF	Somatório dos Tempos de Bom funcionamento Entre Falhas (horas)
TT	Total de Tempo de Estudo (horas)
Obs.	Observações, Discriminação da Causa da Falha

A identificação da causa de cada ocorrência é feita através das colunas com os respectivos códigos das falhas, fazendo corresponder a cada registo, o dígito “1” à verificação da ocorrência e o dígito “0” à não ocorrência.

### III.3. Dados Seleccionados

Os dados recolhidos foram seleccionados e agrupados em quatro grupos diferentes, correspondendo à ocorrência de falhas entre grandes reparações.

Os 4 quadros que se seguem apresentam as listagens das ocorrências registadas e seleccionadas para os 4 diferentes períodos de tempo a que se refere o estudo.

Os quadros são:

**Quadro III.3** - Dados desde o início do estudo até à primeira Grande Reparação (Início até GR1)

**Quadro III.4** - Dados desde a primeira Grande Reparação à segunda Grande Reparação (GR1 até GR2)

**Quadro III.5** - Dados desde a segunda Grande Reparação à terceira Grande Reparação (GR2 até GR3)

**Quadro III.6** - Dados desde a terceira Grande Reparação ao fim do estudo (GR3 até Fim)

Quadro III.3 – Dados desde o início do estudo até à primeira Grande Reparação (Início até GR1)

N(º)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
0	-	-	1-1-01	0:00	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	5-1-01	3:10	5-1-01	10:25	7:25	7:25	99,17	99,17	99,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5-1-01	14:50	7-1-01	21:10	54:33	61:56	4,42	103,58	110,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	10-1-01	10:15	10-1-01	11:15	1:00	62:58	61,08	164,67	226,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	12-1-01	2:55	12-1-01	3:10	0:25	62:83	39,67	204,33	266,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	12-1-01	6:45	12-1-01	7:35	0:83	63:67	3,56	207,92	270,75	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	14-1-01	20:55	14-1-01	21:55	1:00	64:67	61,33	269,25	332,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	17-1-01	2:45	17-1-01	11:05	8:33	73:00	52,83	322,08	396,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	23-1-01	6:00	24-1-01	10:35	26:58	101:56	138,92	461,00	534,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	6-2-01	10:35	9-2-01	1:30	62:52	164:50	312,00	773,00	874,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	9-2-01	16:37	10-2-01	2:30	9:86	174:36	15,12	788,12	952,62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	19-2-01	1:25	19-2-01	1:40	0:25	174:63	214,92	1003,03	1177,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	19-2-01	12:40	20-2-01	1:25	12:75	187:38	11,00	1014,03	1186,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	25-2-01	20:30	26-2-01	1:45	5:25	192:63	139,06	1153,12	1340,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	3-3-01	3:00	3-3-01	11:10	8:17	200:80	121,25	1274,37	1467,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	10-3-01	8:00	10-3-01	21:30	13:50	214:30	164,83	1439,20	1640,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	11-3-01	23:25	12-3-01	13:10	13:75	228:05	25,92	1465,12	1679,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	17-3-01	3:30	17-3-01	6:00	2:50	230:55	110,33	1575,45	1803,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	19-3-01	14:10	19-3-01	14:30	0:33	230:86	56,17	1631,62	1862,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	31-3-01	9:30	31-3-01	17:00	7:50	238:36	283,00	1914,62	2145,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2-4-01	3:45	2-4-01	5:25	1:67	240:05	34,75	1949,37	2187,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	3-4-01	10:15	3-4-01	16:00	7:75	247:80	28,83	1978,20	2216,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	4-4-01	16:00	7-4-01	2:00	56:00	303:80	24,00	2002,20	2250,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	11-4-01	13:50	11-4-01	15:15	1:42	305:22	107,83	2110,03	2413,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	11-4-01	22:55	12-5-01	13:30	734:58	1039:80	7,67	2117,70	2422,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro III.4 – Dados desde a primeira Grande Reparação à segunda Grande Reparação (GR1 até GR2)

N(0)	DP	HP	DA	HA	TR	STR	TBF	STBF	TT	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
0	-	-	12-5-01	13:30	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	12-5-01	15:15	12-5-01	17:00	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	12-5-01	20:00	13-5-01	16:25	20,42	22,17	3,00	4,75	6,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	13-5-01	18:20	13-5-01	19:15	0,92	23,08	1,92	5,67	28,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	13-5-01	20:30	13-5-01	23:00	2,17	25,25	1,58	8,25	31,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	16-5-01	16:30	16-5-01	21:00	4,50	29,75	65,50	73,75	99,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	18-5-01	20:40	18-5-01	23:00	2,33	32,08	47,67	121,42	151,17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	22-5-01	6:55	22-5-01	12:05	5,17	37,25	79,92	201,33	233,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	26-5-01	3:30	26-5-01	4:30	1,00	38,25	87,42	268,75	325,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	27-5-01	5:05	27-5-01	7:20	2,25	40,50	24,58	313,33	351,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	28-5-01	10:30	28-5-01	12:50	2,33	42,83	27,17	340,50	381,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	28-5-01	14:10	28-5-01	15:30	1,33	44,17	1,33	341,83	384,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	3-6-01	3:00	3-6-01	7:50	4,83	49,00	131,50	473,33	517,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	3-6-01	7:55	3-6-01	11:15	3,33	52,33	0,08	473,42	522,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	8-6-01	8:10	8-6-01	8:30	0,33	52,67	116,92	590,33	642,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	12-6-01	8:20	12-6-01	8:35	0,25	52,92	95,83	686,17	738,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	13-6-01	21:30	13-6-01	22:35	1,08	54,00	35,92	723,08	775,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	16-6-01	8:35	16-6-01	8:50	0,25	54,25	58,00	781,08	835,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	19-6-01	16:25	19-6-01	20:50	4,42	58,67	79,56	860,67	914,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	22-6-01	6:00	22-6-01	12:20	6,33	65,00	57,17	917,83	978,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	28-6-01	10:30	28-6-01	11:15	0,75	65,75	142,17	1060,00	1125,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	6-7-01	23:45	7-7-01	1:10	1,42	67,17	204,50	1264,50	1330,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	9-7-01	20:45	10-7-01	13:45	17,00	84,17	67,58	1332,08	1399,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	13-7-01	16:55	13-7-01	17:25	0,50	84,67	75,17	1407,95	1491,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	14-7-01	14:05	14-7-01	14:15	0,17	84,83	20,67	1427,92	1512,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	29-7-01	16:25	29-7-01	21:15	4,83	89,67	362,17	1790,08	1874,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	29-7-01	21:30	30-7-01	11:15	13,75	103,42	0,25	1790,33	1880,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	4-8-01	1:20	4-8-01	3:50	2,50	105,92	110,08	1900,42	2003,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	4-8-01	14:55	4-8-01	16:50	1,92	107,83	11,08	1911,50	2017,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	6-8-01	0:55	6-8-01	4:35	3,67	111,50	32,08	1943,58	2051,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	8-8-01	10:15	8-8-01	22:15	12,00	123,50	53,67	1997,95	2108,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	12-8-01	18:40	14-8-01	21:30	50,83	174,33	92,42	2089,67	2213,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	20-8-01	2:37	20-8-01	4:05	1,47	175,80	125,12	2214,78	2369,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	25-8-01	0:35	25-8-01	16:45	16,17	191,97	116,50	2331,28	2507,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	27-8-01	22:25	28-8-01	20:30	22,08	214,05	53,67	2384,95	2575,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	29-8-01	2:20	29-8-01	3:50	1,50	215,55	5,83	2390,78	2504,83	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	29-8-01	7:20	29-8-01	16:25	9,08	224,63	3,50	2394,28	2508,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	30-8-01	20:20	2-9-01	3:20	85,00	279,63	27,92	2422,20	2548,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	4-9-01	8:25	4-9-01	8:45	0,33	279,97	53,08	2475,28	2754,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	5-9-01	3:15	5-9-01	6:00	2,75	282,72	18,50	2493,78	2773,75	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	6-9-01	15:45	6-9-01	18:20	2,58	285,30	33,75	2527,33	2810,25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	17-9-01	15:45	18-9-01	3:35	11,83	297,13	261,42	2768,95	3074,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	18-9-01	9:55	18-9-01	14:40	4,75	301,88	6,33	2795,28	3092,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(Continua na página seguinte)



85	2-4-02	2-4-02	4-35
----	--------	--------	------

(Continua na página seguinte)

[illegible]

(Continuação do Quadro III.4)

Nº	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
87	10-4-02	11:05	10-4-02	11:35	0.50	776.92	198.50	7213.17	7999.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	15-4-02	9:20	15-4-02	3:35	18.25	795.17	117.75	7330.92	8107.83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
89	22-4-02	9:15	22-4-02	9:50	0.58	795.75	149.67	7480.58	8275.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	23-4-02	7:00	23-4-02	19:15	12.25	808.00	21.17	7501.75	8297.50	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91	24-4-02	9:40	24-4-02	10:40	1.00	809.00	14.42	7516.17	8324.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	1-5-02	4:10	26-5-02	1:00	596.83	1405.83	161.50	7677.67	8486.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro III.5 – Dados desde a segunda Grande Reparação à terceira Grande Reparação (GR2 até GR3)

N(1)	DP	HP	DA	HA	TR	STR	TBF	XTBF	TT	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
0	-	-	26-5-02	1:00	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	27-5-02	0:45	27-5-02	2:20	1:58	1:58	23:75	23:75	23:75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	27-5-02	3:10	27-5-02	5:50	2:67	4:25	0:83	24:58	26:17	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	27-5-02	6:55	27-5-02	7:40	0:75	5:00	1:08	25:67	29:92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	27-5-02	9:15	27-5-02	11:00	1:75	6:75	1:58	27:25	32:25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	27-5-02	15:00	27-5-02	22:05	7:08	13:83	4:00	31:35	38:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1-6-02	21:10	2-6-02	2:20	5:17	19:00	119:08	150:33	164:17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	3-6-02	6:00	3-6-02	11:05	5:08	24:08	27:67	178:00	197:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3-6-02	16:20	5-6-02	18:30	50:17	74:25	5:25	183:25	207:33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10-6-02	23:25	11-6-02	5:20	5:92	80:17	124:92	308:17	392:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	12-6-02	7:25	12-6-02	11:05	3:67	83:83	26:08	334:25	414:42	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	17-6-02	9:50	17-6-02	22:45	12:92	96:75	118:75	453:00	536:83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	20-6-02	17:55	20-6-02	18:15	0:33	97:08	67:17	520:17	616:92	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	24-6-02	11:00	24-6-02	22:50	11:83	108:92	88:75	608:92	706:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	27-6-02	8:25	27-6-02	10:20	1:92	110:83	57:58	666:50	775:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15	7-7-02	12:00	7-7-02	12:05	0:08	110:92	241:67	908:17	1019:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	9-7-02	23:20	10-7-02	12:43	13:38	124:30	59:25	957:42	1078:33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
17	10-7-02	14:25	11-7-02	2:50	12:42	136:72	1:70	959:12	1093:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	11-7-02	2:53	11-7-02	7:00	4:12	140:83	0:05	959:17	1105:88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	15-7-02	15:55	15-7-02	16:55	1:00	141:83	104:92	1074:08	1214:92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	16-7-02	18:30	16-7-02	19:05	0:58	142:42	25:58	1099:67	1241:50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	17-7-02	11:00	17-7-02	22:15	11:25	153:67	15:92	1115:58	1258:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	21-7-02	4:50	21-7-02	6:20	1:50	155:17	78:58	1194:17	1347:83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	21-7-02	6:21	21-7-02	9:30	3:15	158:32	0:02	1194:18	1349:35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
24	21-7-02	21:50	21-7-02	21:55	0:08	158:40	12:33	1206:52	1364:83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
25	22-7-02	4:50	22-7-02	5:10	0:33	158:73	6:92	1213:43	1371:83	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	27-7-02	0:27	27-7-02	10:30	10:05	168:78	115:28	1328:72	1487:45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
27	29-7-02	9:25	1-8-02	4:30	67:08	235:87	46:92	1375:63	1544:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	2-8-02	8:20	2-8-02	11:00	2:67	238:53	27:83	1403:47	1639:33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	5-8-02	17:45	7-8-02	0:35	6:83	245:37	102:75	1506:22	1744:75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
30	7-8-02	3:55	8-8-02	1:20	21:42	266:78	3:33	1509:55	1754:92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	9-8-02	14:20	9-8-02	18:50	4:50	271:28	37:00	1546:55	1813:33	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	15-8-02	20:15	16-8-02	1:10	4:92	276:20	145:42	1691:97	1953:25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
33	16-8-02	6:30	16-8-02	9:05	0:58	276:78	7:33	1699:30	1975:50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	18-8-02	23:00	19-8-02	0:20	1:33	278:12	61:92	1751:22	2035:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
35	22-8-02	14:40	22-8-02	16:45	2:08	280:20	86:33	1847:55	2125:67	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	23-8-02	3:15	23-8-02	3:30	0:25	280:45	10:50	1858:05	2138:25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
37	25-8-02	15:50	26-8-02	2:20	10:50	290:95	60:33	1918:38	2198:83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	26-8-02	2:25	26-8-02	8:45	6:33	297:26	0:08	1918:47	2209:42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	27-8-02	19:00	28-8-02	0:40	5:67	302:95	34:25	1952:72	2250:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
40	30-8-02	7:15	30-8-02																																	

(Continua na página seguinte)

[illegible]

(Continuação do Quadro III.5)

Nit	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
87	15-2-03	14:10	15-2-03	21:00	6.83	724.52	0.23	5655.48	6373.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	16-2-03	14:33	16-2-03	19:40	5.12	729.63	17.55	5673.03	6397.55	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
89	26-2-03	8:35	26-2-03	10:55	2.33	731.97	276.92	5549.95	6679.58	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	26-2-03	11:00	26-2-03	11:30	0.50	732.47	0.08	5550.03	6682.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91	2-3-03	21:45	3-3-03	20:00	22.25	754.72	58.25	6008.28	6740.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	4-3-03	12:26	4-3-03	14:15	1.82	756.53	16.43	6024.72	6779.43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
93	11-3-03	19:00	12-3-03	5:50	10.83	767.37	172.75	6197.47	6954.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94	16-3-03	0:30	19-3-03	10:00	33.50	800.87	138.67	6336.13	7103.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	19-3-03	17:55	19-3-03	18:45	0.83	801.70	7.92	6344.05	7144.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96	20-3-03	16:05	20-3-03	16:35	0.50	802.20	21.33	6365.38	7167.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97	22-3-03	18:20	22-3-03	20:10	1.83	804.03	49.75	6415.13	7217.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98	3-4-03	23:40	4-4-03	6:20	6.67	810.70	291.50	6706.63	7510.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	5-4-03	4:10	5-4-03	21:40	17.50	828.20	21.63	6728.47	7539.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
#	15-4-03	13:20	15-4-03	13:35	0.56	828.76	231.67	6960.13	7786.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
#	27-4-03	1:05	27-4-03	11:35	10.50	839.26	275.17	7235.30	8064.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
#	27-4-03	11:40	27-4-03	16:55	5.25	844.53	0.06	7235.36	8074.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Quadro III.6 – Dados desde a terceira Grande Reparação ao fim do estudo (GR3 até Fim)

N(i)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	
0	-	-	31-5-03	11:55	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	12-6-03	1:10	12-6-03	6:30	5:33	5:33	277,25	277,25	277,25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	12-6-03	7:35	12-6-03	10:20	2:75	8:08	1,08	278,33	283,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	12-6-03	17:30	14-6-03	1:55	32:42	40:50	7,17	285,50	293,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	1-7-03	4:10	1-7-03	12:45	8:58	49:08	410,25	695,75	736,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5	9-7-03	22:30	10-7-03	6:45	8:25	57:33	201,75	897,50	946,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	10-7-03	15:25	10-7-03	17:20	1:92	59:25	8,67	906,17	953,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	11-7-03	18:30	13-7-03	13:20	42:83	102:08	25,17	931,33	990,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	14-7-03	3:55	14-7-03	5:20	1:42	103:50	14,58	945,92	1048,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	14-7-03	5:25	14-7-03	9:40	4:25	107:75	0,08	946,00	1049,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	14-7-03	21:20	15-7-03	0:20	3:00	110:75	11,67	957,67	1055,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
11	18-7-03	1:35	18-7-03	8:25	6:53	117:58	73,25	1030,92	1141,57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
12	24-7-03	14:05	24-7-03	19:45	5:67	123:25	149,67	1180,58	1296,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13	24-7-03	19:50	25-7-03	9:00	13:17	136:42	0,08	1180,67	1303,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	31-7-03	20:00	1-8-03	1:40	5:67	142:08	155,00	1335,67	1472,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	2-8-03	9:10	2-8-03	10:10	1:00	143:08	31,50	1367,17	1509,25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	2-8-03	14:25	2-8-03	17:40	3:25	146:33	4,25	1371,42	1514,50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	3-8-03	1:35	3-8-03	5:55	4:33	150:67	7,92	1379,33	1525,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	3-8-03	15:25	3-8-03	16:25	1:00	151:67	9,50	1388,83	1539,50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	13-8-03	12:15	14-8-03	9:20	21:08	172:75	235,83	1624,67	1776,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	14-8-03	11:15	14-8-03	16:30	5:25	178:00	1,92	1626,58	1799,33	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	21-8-03	7:00	21-8-03	7:30	0:50	178:50	158,50	1785,08	1953,08	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	23-8-03	3:05	23-8-03	3:20	0:25	178:75	43,58	1828,67	2007,17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	23-8-03	6:25	23-8-03	6:40	0:25	179:00	3,08	1831,75	2010,50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	24-8-03	2:17	24-8-03	3:25	1:13	180:13	19,52	1851,37	2030,37	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	24-8-03	6:50	24-8-03	9:10	2:33	182:47	3,42	1854,78	2034,92	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	29-8-03	19:26	30-8-03	0:30	5:07	187:53	130,27	1985,05	2167,52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	3-9-03	10:25	4-9-03	8:45	22:33	209:87	105,92	2090,97	2276,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	12-9-03	15:08	12-9-03	18:20	3:20	213:07	198,36	2289,35	2499,22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	15-9-03	21:30	15-9-03	1:05	3:58	216:55	75,17	2364,52	2577,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																

(Continua na página seguinte)

(Continuação do Quadro III.6)

N(º)	DP	HP	DA	HA	TR	ΣTR	TBF	ΣTBF	TT	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
43	24-10-03	12:15	24-10-03	20:00	7,75	355,28	62,83	3156,80	3504,33	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	25-10-03	3:45	25-10-03	5:10	1,42	356,70	7,75	3164,55	3519,83	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	25-10-03	5:17	25-10-03	20:05	38,80	395,50	0,12	3164,67	3521,37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
46	27-10-03	9:46	27-10-03	14:45	4,98	400,48	13,68	3178,35	3573,65	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	27-10-03	19:15	28-10-03	1:00	5,75	406,23	4,50	3182,85	3583,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
48	28-10-03	13:15	28-10-03	18:20	5,08	411,32	12,25	3195,10	3601,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
49	3-11-03	15:15	4-11-03	1:40	10,42	421,73	140,92	3336,02	3747,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
50	7-11-03	9:00	7-11-03	10:55	1,92	423,65	79,33	3415,35	3837,08	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	7-11-03	11:00	7-11-03	14:40	3,67	427,32	0,08	3415,43	3839,08	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	12-11-03	1:30	12-11-03	2:15	0,75	428,07	106,83	3522,27	3949,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
53	12-11-03	16:15	12-11-03	16:30	0,25	428,32	14,00	3536,27	3964,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	12-11-03	16:33	13-11-03	11:45	19,20	447,52	0,05	3536,32	3964,63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
55	20-11-03	0:10	20-11-03	9:25	9,25	456,77	156,42	3592,73	4140,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
56	22-11-03	7:55	22-11-03	16:50	8,92	465,68	46,50	3739,23	4195,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
57	23-11-03	12:54	23-11-03	16:45	3,85	469,53	20,07	3759,30	4224,98	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	26-11-03	5:16	26-11-03	13:55	8,65	478,18	60,52	3819,82	4289,35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	4-12-03	23:25	5-12-03	3:05	3,67	481,85	201,50	4021,32	4499,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	5-12-03	23:30	6-12-03	1:20	1,83	483,68	20,42	4041,73	4523,58	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	6-12-03	9:00	6-12-03	10:40	1,67	485,35	7,67	4049,40	4533,08	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	6-12-03	10:55	6-12-03	22:15	11,33	486,68	0,25	4049,65	4535,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	7-12-03	7:00	7-12-03	8:55	1,92	488,60	8,75	4058,40	4555,08	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	8-12-03	2:25	8-12-03	4:00	1,58	500,18	17,50	4075,90	4574,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	13-12-03	1:03	13-12-03	3:35	2,53	502,72	117,05	4192,95	4593,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	17-12-03	19:25	17-12-03	23:20	3,92	506,63	111,83	4304,78	4807,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	18-12-03	1:05	18-12-03	4:00	2,92	509,55	1,75	4306,53	4813,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	19-12-03	2:00	19-12-03	11:20	9,33	518,88	22,00	4328,53	4838,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	19-12-03	11:25	21-12-03	1:35	38,17	557,05	0,08	4328,62	4847,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	21-12-03	3:00	21-12-03	4:20	1,33	558,38	1,42	4330,03	4867,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	21-12-03	8:30	21-12-03	10:40	2,17	560,55	4,17	4334,20	4892,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72	21-12-03	15:35	21-12-03	18:35	3,00	563,55	4,92	4339,12	4899,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	22-12-03	17:41	23-12-03	1:45	8,07	571,62	23,10	4362,22	4925,77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74	24-12-03	4:35	24-12-03	9:00	4,42	576,03	26,83	4389,05	4960,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	26-12-03	10:05	26-12-03	10:20	0,25	576,28	49,08	4438,13	5014,17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	26-12-03	10:25	26-12-03	17:10	6,75	583,03	0,08	4438,22	5014,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77	27-12-03	4:35	28-12-03	0:40	20,25	603,28	11,25	4449,47	5032,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	28-12-03	10:25	28-12-03	11:15	0,83	604,12	9,75	4459,22	5062,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
79	1-1-04	0:00	-	-	-	604,12	84,75	4543,97	5145,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## ANEXO IV – Tabelas Estatísticas

Neste anexo são apresentadas as tabelas estatísticas utilizadas na aplicação de modelos estatísticos que permitiram o desenvolvimento do tema. Nomeadamente, para o nível de significância no teste de Laplace e na definição de intervalos de confiança no modelo de Crow.

Assim, as tabelas estatísticas apresentadas seguidamente são:

- Distribuição Normal, Pontos percentuais (Z+);
- Distribuição Normal, Pontos percentuais (Z-);
- Modelo de Crow, Teste Limitado por Tempo, Intervalos de Confiança;
- Modelo de Crow, Teste Limitado por Falhas, Nível de Significância “P”



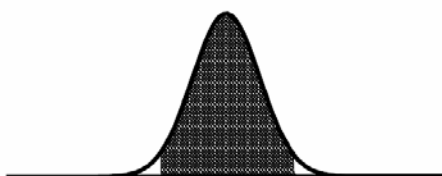
## DISTRIBUIÇÃO NORMAL – Pontos percentuais

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-4,1	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99999	0,99999
-4,0	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998
-3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997
-3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995
-3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992
-3,6	0,99984	0,99985	0,99985	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989
-3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983
-3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976
-3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965
-3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950
-3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929
-3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99896	0,99900
-2,9	0,99813	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861
-2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807
-2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
-2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
-2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
-2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
-2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
-2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
-2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
-2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
-1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
-1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
-1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
-1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
-1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
-1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
-1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
-1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
-1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
-1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
-0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
-0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
-0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
-0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
-0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
-0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
-0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
-0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
-0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
-0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359

**DISTRIBUIÇÃO NORMAL – Pontos percentuais**

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
2,8	0,00256	0,00248	0,00240	0,00233	0,00226	0,00219	0,00212	0,00205	0,00199	0,00193
2,9	0,00187	0,00181	0,00175	0,00169	0,00164	0,00159	0,00154	0,00149	0,00144	0,00139
3,0	0,00135	0,00131	0,00126	0,00122	0,00118	0,00114	0,00111	0,00107	0,00104	0,00100
3,1	0,00097	0,00094	0,00090	0,00087	0,00084	0,00082	0,00079	0,00076	0,00074	0,00071
3,2	0,00069	0,00066	0,00064	0,00062	0,00060	0,00058	0,00056	0,00054	0,00052	0,00050
3,3	0,00048	0,00047	0,00045	0,00043	0,00042	0,00040	0,00039	0,00038	0,00036	0,00035
3,4	0,00034	0,00032	0,00031	0,00030	0,00029	0,00028	0,00027	0,00026	0,00025	0,00024
3,5	0,00023	0,00022	0,00022	0,00021	0,00020	0,00019	0,00019	0,00018	0,00017	0,00017
3,6	0,00016	0,00015	0,00015	0,00014	0,00014	0,00013	0,00013	0,00012	0,00012	0,00011
3,7	0,00011	0,00010	0,00010	0,00010	0,00009	0,00009	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008
3,8	0,00007	0,00007	0,00007	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	0,00005	0,00005	0,00005
3,9	0,00005	0,00005	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00003	0,00003
4,0	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
4,1	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00001	0,00001

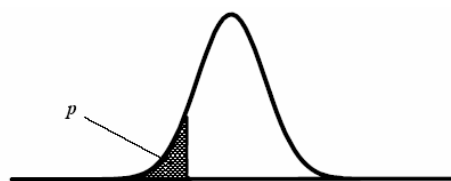
# MODELO DE CROW – Teste Limitado por Tempo - Intervalos de Confiança



n	CONFIDENCE COEFFICIENT							
	.80		.90		.95		.98	
	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_1$	$\pi_2$
2	.261	18.655	.200	38.661	.159	78.664	.124	108.665
3	.333	6.326	.263	9.736	.217	14.552	.174	24.103
4	.385	4.243	.312	5.947	.262	8.093	.215	11.811
5	.426	3.356	.352	4.517	.300	5.862	.250	8.043
6	.459	2.915	.385	3.764	.331	4.738	.280	6.254
7	.487	2.616	.412	3.298	.358	4.061	.305	5.216
8	.511	2.407	.436	2.981	.382	3.609	.328	4.539
9	.531	2.254	.457	2.750	.403	3.285	.349	4.064
10	.549	2.136	.476	2.575	.421	3.042	.367	3.712
11	.565	2.041	.492	2.436	.438	2.852	.384	3.441
12	.579	1.965	.507	2.324	.453	2.699	.399	3.226
13	.592	1.901	.521	2.232	.467	2.574	.413	3.050
14	.604	1.846	.533	2.153	.480	2.469	.426	2.904
15	.614	1.800	.545	2.087	.492	2.379	.438	2.781
16	.624	1.759	.556	2.029	.503	2.302	.449	2.675
17	.633	1.723	.565	1.978	.513	2.235	.460	2.584
18	.642	1.692	.575	1.933	.523	2.176	.470	2.503
19	.650	1.663	.583	1.893	.532	2.123	.479	2.432
20	.657	1.638	.591	1.858	.540	2.076	.488	2.369
21	.664	1.615	.599	1.825	.548	2.034	.496	2.313
22	.670	1.594	.606	1.796	.556	1.996	.504	2.261
23	.676	1.574	.613	1.769	.563	1.961	.511	2.215
24	.682	1.557	.619	1.745	.570	1.929	.518	2.173
25	.687	1.540	.625	1.722	.576	1.900	.525	2.134
26	.692	1.525	.631	1.701	.582	1.873	.531	2.098
27	.697	1.511	.636	1.682	.588	1.848	.537	2.066
28	.702	1.498	.641	1.664	.594	1.825	.543	2.035
29	.706	1.486	.646	1.647	.599	1.803	.549	2.006
30	.711	1.475	.651	1.631	.604	1.783	.554	1.980
35	.729	1.427	.672	1.565	.627	1.699	.579	1.870
40	.745	1.390	.690	1.515	.646	1.635	.599	1.788
45	.758	1.361	.705	1.476	.662	1.585	.617	1.723
50	.769	1.337	.718	1.443	.676	1.544	.632	1.671
60	.787	1.309	.739	1.393	.700	1.481	.657	1.591
70	.801	1.272	.756	1.355	.718	1.435	.678	1.533
80	.813	1.251	.769	1.328	.734	1.399	.695	1.488
100	.831	1.219	.791	1.286	.758	1.347	.722	1.423



# **MODELO DE CROW – Teste Limitado por Falhas – Nível de Significância “P”**



$\frac{p}{n}$	.005	.010	.025	.050	.100	.900	.950	.975	.990	.995
2	.2373	.2944	.4093	.5552	.8055	33.76	72.67	151.5	389.9	783.6
3	.2627	.3119	.4054	.5137	.6840	8.927	14.24	21.96	37.60	55.52
4	.2992	.3363	.4225	.5174	.6601	5.326	7.651	10.65	15.96	21.31
5	.3151	.3603	.4415	.5290	.6563	4.000	5.424	7.147	9.935	12.63
6	.3372	.3815	.4555	.5421	.6600	3.321	4.339	5.521	7.353	9.076
7	.3569	.4003	.4760	.5548	.6555	2.910	3.702	4.555	5.953	7.162
8	.3746	.4173	.4910	.5668	.6720	2.634	3.284	4.002	5.071	5.993
9	.3905	.4327	.5046	.5780	.6787	2.435	2.999	3.589	4.469	5.211
10	.4052	.4467	.5171	.5893	.6852	2.287	2.770	3.285	4.032	4.652
11	.4185	.4595	.5285	.5979	.6915	2.170	2.600	3.051	3.702	4.233
12	.4309	.4712	.5391	.6067	.6975	2.076	2.464	2.870	3.443	3.909
13	.4422	.4821	.5498	.6150	.7033	1.993	2.353	2.721	3.235	3.650
14	.4528	.4923	.5579	.6227	.7037	1.933	2.260	2.597	3.054	3.438
15	.4627	.5017	.5664	.6299	.7139	1.877	2.182	2.493	2.921	3.262
16	.4719	.5106	.5743	.6357	.7189	1.829	2.114	2.404	2.800	3.113
17	.4807	.5189	.5813	.6431	.7234	1.788	2.055	2.327	2.695	2.985
18	.4889	.5267	.5888	.6491	.7276	1.751	2.004	2.259	2.604	2.874
19	.4967	.5341	.5954	.6547	.7320	1.718	1.959	2.200	2.524	2.777
20	.5040	.5411	.6016	.6601	.7360	1.683	1.918	2.147	2.453	2.691
21	.5110	.5478	.6076	.6652	.7398	1.652	1.881	2.099	2.390	2.614
22	.5177	.5541	.6132	.6701	.7434	1.623	1.848	2.055	2.333	2.546
23	.5240	.5601	.6186	.6747	.7469	1.616	1.818	2.017	2.281	2.484
24	.5301	.5659	.6237	.6791	.7502	1.596	1.790	1.982	2.235	2.428
25	.5359	.5714	.6286	.6833	.7534	1.578	1.765	1.949	2.192	2.377
26	.5415	.5766	.6333	.6873	.7565	1.561	1.742	1.919	2.153	2.330
27	.5469	.5817	.6378	.6912	.7594	1.545	1.720	1.892	2.116	2.287
28	.5519	.5865	.6421	.6949	.7622	1.530	1.700	1.866	2.083	2.247
29	.5563	.5912	.6462	.6985	.7649	1.516	1.682	1.842	2.052	2.211
30	.5616	.5957	.6502	.7019	.7676	1.504	1.664	1.820	2.023	2.176
35	.5829	.6158	.6681	.7173	.7794	1.450	1.592	1.729	1.905	2.036
40	.6010	.6328	.6832	.7303	.7894	1.410	1.538	1.660	1.816	1.932
45	.6168	.6476	.6952	.7415	.7981	1.378	1.495	1.605	1.747	1.852
50	.6305	.6605	.7076	.7513	.8057	1.352	1.460	1.562	1.692	1.787
60	.6538	.6823	.7267	.7670	.8194	1.312	1.407	1.496	1.607	1.689
70	.6723	.7000	.7423	.7811	.8283	1.282	1.367	1.447	1.546	1.618
80	.6887	.7148	.7553	.7922	.8375	1.259	1.337	1.409	1.493	1.564
100	.7142	.7384	.7759	.8100	.8514	1.225	1.293	1.355	1.431	1.486

## **ANEXO V – Canhões de Ar Comprimido**

### **V.1. Introdução**

Neste anexo, é apresentada uma pequena descrição do funcionamento dos canhões de ar comprimido, recorrendo a figuras, que ilustram também diversos aspectos da instalação do equipamento.

São apresentados também, desenhos técnicos que mostram a disposição equacionada para a instalação dos canhões de ar nos ciclones. As instalações desenvolveram-se nos ciclones 2, 3 e 4 da torre de pré-aquecimento e na câmara de fumos, junto à entrada do forno do sistema de cozedura de cimento do CPL.

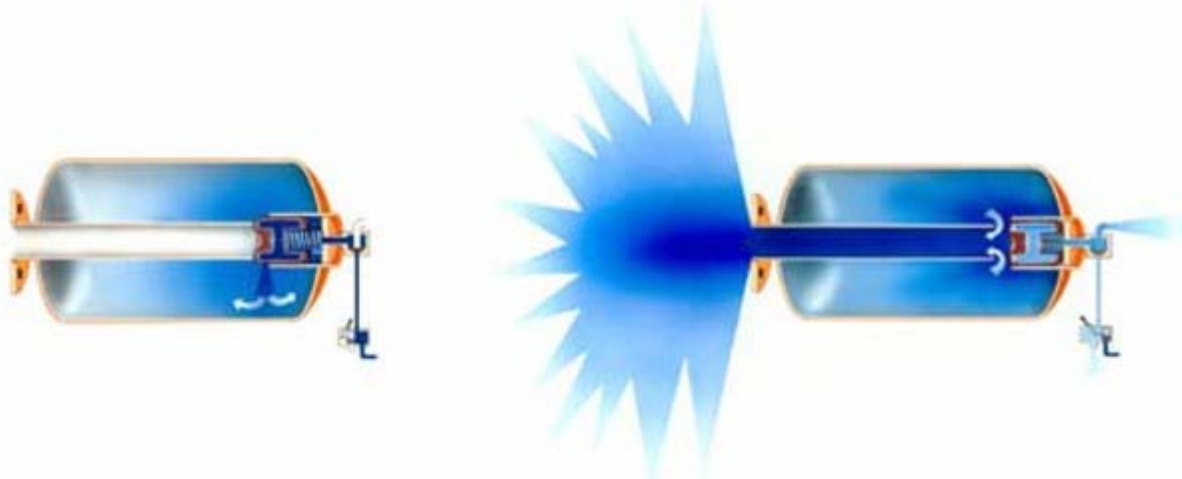
### **V.2. Canhões de Ar**

Os canhões de ar são usados para remover pneumáticamente obstruções de matéria, em locais de difícil acesso e de constantes entupimentos. Realizam descargas de ar comprimido para o interior de equipamentos, tais como: tubagens, tapetes transportadores fechados, tremonhas, silos, depósitos de matéria, ciclones, permutadores de calor, etc. São bastante usados em áreas de elevada temperatura de centrais termoeléctricas e de fabrico de cimento, mesmo acima dos 1000 °C.

Estas aplicações são também aconselhadas na substituição das acções manuais das respectivas remoções de matéria com jactos de ar ou de água ou mesmo com ferramentas, que frequentemente resultam em acidentes.

No caso prático do CPL, os canhões de ar são instalados no exterior dos ciclones. Armazenam ar a pressões na ordem dos 4 a 10 bar, que injectam, explosivamente, em milissegundos nas zonas críticas internas, onde se agregam as materiais

indesejavelmente. A figura V.1 mostra o princípio de funcionamento do canhão de ar. Numa primeira fase, é insuflado ar para o interior da câmara de compressão e numa segunda fase, quando atingida a pressão programada, é injectado (como um sopro, +/- 6 bar) esse ar, através de um bocal, para o interior do ciclone.



**Figura V.1 – Funcionamento do canhão de ar comprimido**

Fonte: [www.vsr-industrietechnik.de](http://www.vsr-industrietechnik.de), em 20 de Dezembro de 2004

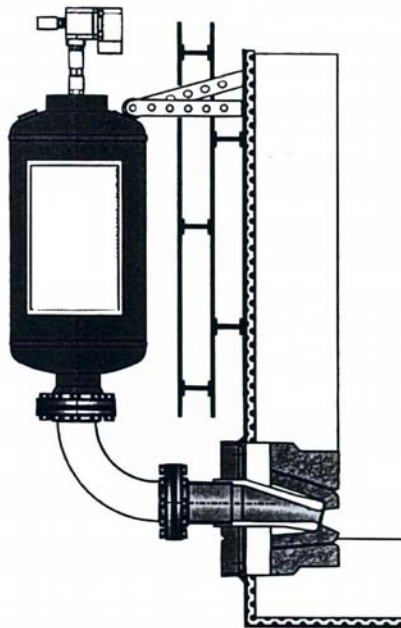
A localização para a instalação dos canhões, deverá ser equacionada de modo a que a sua actuação abranja as zonas mais críticas. A figura V.2 ilustra uma possível disposição de canhões de ar comprimido no pré-aquecimento de um sistema de cozedura da indústria cimenteira.



**Figura V.2 – Possível disposição de canhões de ar comprimido num sistema de pré-aquecimento**

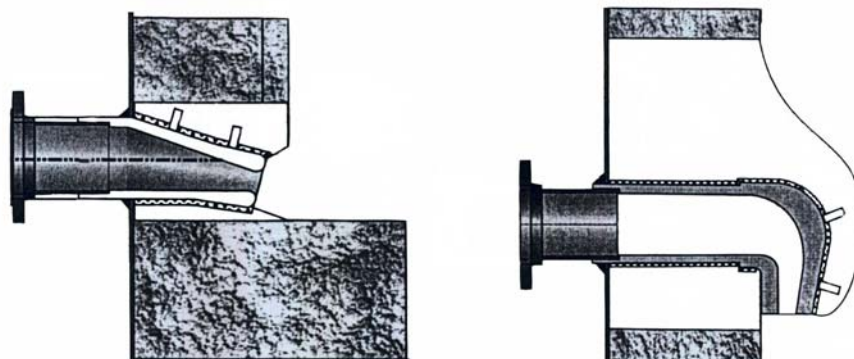
Fonte: [www.vsr-industrietechnik.de](http://www.vsr-industrietechnik.de), em 20 de Dezembro de 2004

As figuras que se seguem (figuras V.3 e V.4), mostram através de esquemas elucidativos, como são montados os canhões de ar nos ciclones. O reservatório (câmara de compressão) e respectivos dispositivos pneumáticos necessários são fixos no exterior da parede do ciclone. O ar comprimido circulará por tubagem até ao bocal de descarga, instalado à face da parede de refractário do ciclone. Consoante a configuração da zona interior do ciclone a actuar e efeito pretendido, assim será escolhido o tipo de bocal adequado.



**Figura V.3 – Canhão de ar comprimido montado no exterior de um ciclone**

Fonte: Catálogo técnico, VSR Blaster Air Cannon, vsr-industrietechnik GmbH

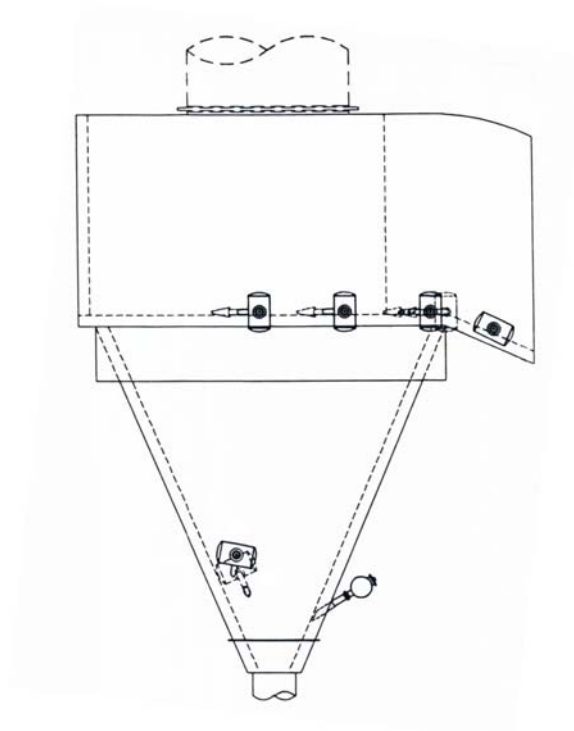


**Figura V.4 – Bocais de canhões de ar comprimido para diferentes localizações**

Fonte: Catálogo técnico, VSR Blaster Air Cannon, vsr-industrietechnik GmbH

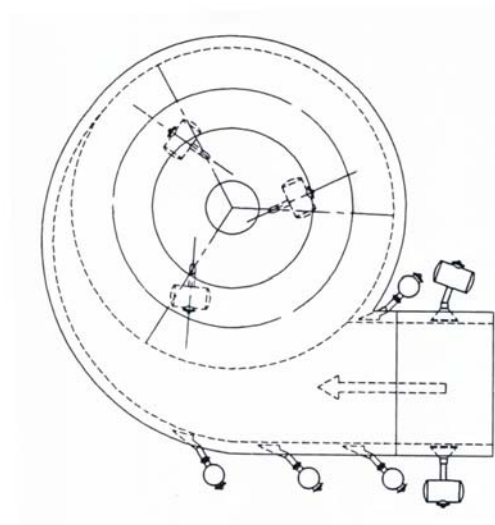
### V.3. Disposição dos Canhões de Ar nos Ciclones

As figuras V.5 e V.6, dizem respeito a desenhos técnicos contendo a disposição equacionada para a instalação dos canhões de ar comprimido por ciclone no CPL.



**Figura V.5 – Disposição de canhões de ar comprimido num ciclone (Alçado Principal)**

Fonte: Desenhos técnicos do CPL



**Figura V.6 – Disposição de canhões de ar comprimido num ciclone (Planta)**

Fonte: Desenhos técnicos do CPL



#### V.4. Fotografias de Equipamentos com Canhões de Ar Instalados

As figuras seguintes são fotografias que ilustram a disposição dos canhões de ar instalados em diversos equipamentos da torre de pré-aquecimento.



Figura V.7 – Canhão de ar instalado no ciclone 2 da torre de pré-aquecimento



Figura V.8 – Cone do ciclone 3 da torre de pré-aquecimento com canhões de ar instalados



Figura V.9 – Disposição dos canhões de ar instalados no ciclone 4 da torre de pré-aquecimento



Figura V.10 – Canhão de ar instalado na saída do ciclone 4 da torre de pré-aquecimento



Figura V.11 – União das tubagens dos ciclones 3 e 4 com a câmara de fumos, entrada para o forno, também com canhões de ar instalados



Figura V.12 – Disposição dos canhões de ar instalados na câmara de fumos, entrada para o forno